

Kaukolämpöasiakslaitteiden jäähdytymän optimointi

**Välisyöttökytkennän toimivuus julkaisun K1/2013
mukaisilla lämmönsiirtimien mitoituslämpötiloilla**

Ilkka Lahtela

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2018
Tekniikan ja liikenteen ala
Insinööri (AMK), energiatekniikan koulutusohjelma

Tekijä Lahtela, Iikka	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Huhtikuu 2018
	Sivumäärä 75	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Kaukolämpöasiakslaitteiden jäähtymän optimointi Välisyöttökytkennän toimivuus julkaisun K1/2013 mukaisilla lämmönsiirtimien mitoitus- lämpötiloilla		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), energiatekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) Marjukka Nuutinen, Kari Hytönen		
Toimeksiantaja Jyväskylän Energia Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Rakennusten kaukolämmityksen ohjeet ja määräykset muuttuivat 1.9.2013, kun julkaisu K1/2013 astui voimaan. Energiateollisuus ry:n julkaisu korvasi aikaisemman kokoelman K1/2003 ja toi alaa koskevien lisäyksien ja tarkennuksien lisäksi muutoksia lämmönsiirrin- ten mitoituslämpötiloihin. Jyväskylän Energian ja sen yhteistyökumppaneiden kesken he- räs kysymys mitoituslämpötilojen toimivuudesta eri kytkentätapojen välillä.</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, miten välisyöttökytkentä vaikuttaa kaukolämpöve- den jäähtymään julkaisun K1/2013 uudistetuilla mitoituslämpötiloilla. Jäähtymätietojen li- säksi selvitettiin kytkentätavan vaikutuksia lämmönjakokeskuksen hintaan sekä asiakkai- den energiamaksuihin.</p> <p>Tutkimustyö toteutettiin tarkastelemalla vuonna 2014 – 2016 valmistuneiden suurien kau- kolämpökohteiden kytkentäkaavioita sekä analysoimalla kohteiden kaukolämpöveden etä- luentamittausdataa vuoden 2017 ajalta. Vertailuksi mittausdataa kerättiin myös vuosien 1995 – 2003 välillä valmistuneista suurkiinteistöistä.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena saatiin tieto siitä, että välisyöttökytkentä on jäähtymän kannalta suositeltava vaihtoehto myös uusilla mitoituslämpötiloilla. Tulokset myös vahvistavat vä- lisyöttökytkennän oleellisen vaikutuksen jäähtymään vanhoilla mitoituslämpötiloilla. Kus- tannusten osalta selvisi, että kytkentätavalla ei ole yksiselitteistä vaikutusta lämmönjako- keskusten hintaan.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksien pohjalta Jyväskylän Energia voi yhtenäistää kytkentätapasuositus- taan keskittyen välisyöttökytkennän suosimiseen samalla varmistuen parhaan mahdollisen jäähtymän saavuttamisesta sekä asiakaslaitteiden toiminnasta.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Kaukolämpö, jäähtymä, välisyöttökytkentä		
Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)		

Author Lahtela, Iikka	Type of publication Bachelor's thesis	Date April 2018
		Language of publication: Finnish
	Number of pages 75	Permission for web publication: x
Title of publication Optimizing the Cooling of District Heating Devices of Buildings Performance of 2-step Connection according to the K1/2013 Design Temperatures of Heat Exchangers		
Degree programme Bachelor's Degree Programme in Energy Technology		
Supervisor(s) Nuutinen, Marjukka Hytönen, Kari		
Assigned by Jyväskylän Energia Ltd.		
Abstract <p>The guidelines and regulations for district heating of buildings changed on September 1, 2013 when publication K1 / 2013 took effect. The publication from Finnish Energy ry replaced the earlier collection K1 / 2003, and besides additions and refinements in the area of business changes were made to the design temperatures of the heat exchangers. Jyväskylän Energia Ltd. together with its partners became interested in how new design temperatures would perform with different district heating connection methods.</p> <p>The purpose of the thesis was to determine how a 2-step connection affects the cooling of the district heating water with the revised design temperatures of publication K1 / 2013. In addition to the cooling data, the effects of connection type on the price of the substation and customer energy charges were studied.</p> <p>The study examined the connectivity diagrams of the large district heating estates constructed in 2014 - 2016 and analyzed district heating water temperatures from the remote reading data from 2017. As a comparison, remote reading data was also collected from large estates constructed between 1995 and 2003.</p> <p>As a result, the thesis determined that the 2-step connection is a preferable choice in cooling at new design temperatures. The results also confirm the essential effect of a 2-step connection to cooling at the old design temperatures. In terms of costs it was found out that connection method doesn't have unambiguous effect on substation prizes.</p> <p>Based on the results of the thesis, Jyväskylän Energia Ltd. can unify its substation connection recommendations focusing on favoring the 2-step connection while ensuring the best possible cooling and the performance of customer devices.</p>		
Keywords/tags (subjects) District Heating, Cooling, 2-step connection		
Miscellaneous (Confidential information)		

Sisältö

Keskeiset käsitteet	5
1 Johdanto	7
1.1 Työn tausta	7
1.2 Työn tavoite.....	8
1.3 Aiheen rajausta.....	9
1.4 Tutkimusote ja tutkimuskysymykset	9
1.5 Tietoperusta	10
2 Jyväskylän Energia Oy	11
2.1 Jyväskylän Energian konsernirakenne ja tunnusluvut	11
2.2 Jyväskylän Energian voima- ja lämpölaitokset	12
2.3 Jyväskylän Energian kaukolämpöverkko	13
3 Tutkimusasetelma	14
3.1 Tutkimusdata.....	14
3.2 Tutkimusdatan käsittely	16
4 Kaukolämpö	17
4.1 Kaukolämmön hyödyt ja haitat	17
4.2 Kaukolämmön tuotanto	18
4.3 Kaukolämmön jakelu	22
4.4 Kaukolämmön asiakaslaitteet	25
4.5 Kaukolämmön määräykset ja ohjeet.....	26
4.6 Asiakaslaitteiden kytkentätavat ja käyttöalueet.....	28
4.6.1 Peruskytkentä	29
4.6.2 Välisyöttökytkentä.....	30
4.6.3 Hybridikytkentä	31

5	Lämmönsiirtimet	34
5.1	Lämmönsiirrintyytit ja niiden toiminta.....	34
5.2	Kaukolämpöasiakkaan lämmönsiirtimet	37
5.3	Mitoitusperiaatteet	37
6	Jäähtymä.....	38
6.1	Jäähtymän vaikutus yhteistuotantolaitokseen	38
6.2	Jäähtymän vaikutukset kaukolämpöverkkoon.....	39
6.3	Jäähtymän vaikutus pumppaustehoon	41
7	Savukaasupesuri.....	43
7.1	Savukaasupesurin toiminta	43
7.2	Jäähtymän vaikutus savukaasupesuriin	45
8	Kustannukset.....	46
8.1	Lämmönjakohuoneen kustannusarviot.....	46
8.2	Vaikutus paluuviesimaksuun	47
9	Tulokset	49
9.1	Opinnäytetyön tutkimustulokset	49
9.2	Tulosten luotettavuuden arviointi	60
10	Johtopäätökset.....	62
10.1	Välisyöttökytkennän kannattavuus.....	62
10.2	Toimenpide-ehdotukset	64
10.3	Jatkotutkimusehdotukset.....	64
	Lähteet	66
	Liitteet.....	69
	Liite 1. Erään kohteen tuntiset meno- ja paluulämpötilat vuodelta 2017.	69
	Liite 2. Esimerkki tutkimuksessa käytetystä tuntidatasta.....	70

Liite 3. Erään kohteen kytkentäkaavio.....	71
Liite 4. Esimerkki vastavalmistuneesta kohteesta, jossa ei vielä ole kulutusta 72	
Liite 5. Uusien otantakohteiden topologinen jakautuminen.....	73
Liite 6. Vanhojen otantakohteiden topologinen jakautuminen	74
Liite 7. Esimerkki mittausteknisistä ongelmista tuntidatassa.....	75

Kuviot

Kuvio 1. Jyväskylän Energian konsernirakenne ja osakkuudet	11
Kuvio 2. Jyväseudun kaukolämpöverkko. Elenian hallinnoimat verkko-osuudet on eroteltu sinisellä värillä ja Muuramen Lämpö Oy:n turkoosilla	14
Kuvio 3. Rauhalahden vastapainevoimalaitoksen prosessikuvaus	19
Kuvio 4. Kaukolämmön käyttö kuukausittain	20
Kuvio 5. Vuoden 2016 keskimääräiset ulkolämpötilat kuukausittain, mittauspaikkana Jyväskylän lentoasema	21
Kuvio 6. Kaukolämmön tuotanto polttoaineittain	22
Kuvio 7. Havainnekuva Mpuk- ja 2Mpuk-johdoista	23
Kuvio 8. Havainnekuva betonikanavajohdoista	24
Kuvio 9. Esimerkki tehdasvalmiista lämmönjakokeskuksesta	26
Kuvio 10. Esimerkki peruskytkennästä.....	29
Kuvio 11. Esimerkki välisyöttökytkennästä	30
Kuvio 12. Esimerkki hybridikytkennästä	32
Kuvio 13. Sarjaankytketyn hybridijärjestelmän vaikutus jäähtymään	34
Kuvio 14. Levylämmönsiirtimen toimintakuvaus.....	36
Kuvio 15. Vesivirta tehon funktiona eri jäähtymillä.....	41
Kuvio 16. Erityyppisten savukaasupesurien toiminta: (a) pesutorni, (b) syklonipesutorni, (c) LTO-pesuri ja (d) venturipesuri.....	44
Kuvio 17. Uusien kohteiden jäähtymät vuodelta 2017	51
Kuvio 18. Uusien kohteiden tulo- ja paluulämpötilat vuodelta 2017	52
Kuvio 19. Tulo- ja paluulämpötilojen erot lämmönsiirrintyyppien välillä.....	53
Kuvio 20. Tulo- ja paluulämpötilojen erot LVI-suunnittelijoiden välillä.....	54

Kuvio 21. Tulo- ja paluulämpötilojen erot siirrinvalmistajien välillä.....	55
Kuvio 22. Tulo- ja paluulämpötilojen erot LVI-urakoitsijoiden välillä	56
Kuvio 23. Lämpötilojen vertailu rakennustyypeittäin	57
Kuvio 24. Vanhojen kohteiden tulo- ja paluulämpötilat vuosittain	58
Kuvio 25. Vanhojen kohteiden jäähtymien vuosivertailu kytkentätavoittain	59
Kuvio 26. Ulkolämpötilojen vertailu.....	60

Taulukot

Taulukko 1. Tutkimuskohteista kerätty tieto	16
Taulukko 2. Uudiskohteiden lämmönsiirrinten mitoituslämpötilat.....	27
Taulukko 3. Uudiskohteiden lämmönsiirrinten mitoituslämpötilat vuodelta 2003	28
Taulukko 4. Jyväskylän Energian paluuvesimaksuperiaate.....	48
Taulukko 5. Paluuvesimaksun vaikutus loppulaskuun	49

Keskeiset käsitteet

Tässä luvussa on määritelty opinnäytetyön kannalta oleelliset ja usein toistuvat käsitteet raportin selkeyttämiseksi.

Asteisuus

Lämmönvaihtimen asteisuudella tarkoitetaan siirtimen jäähtyvän ja lämpenevän vesivirran minimilämpötilaeroa (Teollisuuden energiatekniikka Peruskaavat ja – käsitteet 2011, 18).

Ensiöpuoli

Ensiöpuolella tarkoitetaan laitteita ja putkistoa, joissa virtaa kaukolämpövesi tai joihin sen paine vaikuttaa (Rakennusten kaukolämmitys 2013, 2).

Jäähtymä

Jäähtymä kuvaa kiinteistöön tulevan ja sieltä palaavan kaukolämpöveden lämpötilojen erotusta (Kaukolämpölaitteiden seuranta- ja käyttöohjeita n.d.).

Lämmönjakokeskus

Lämmönjakokeskus käsittää lämmönmyyjän laitekokonaisuuden, joka on liitettyä käyttö- ja lämmitysverkostoihin, paisuntalaitteisiin sekä mittauskeskukseen. Kokonaisuus sisältää pumppauslaitteet, lämmönsiirtimet, toimilaitteet sekä tarvittavan putkiston. (Rakennusten kaukolämmitys. 2013, 2.)

Peruskytkentä

Kaukolämmityksen kytkentätapa, jossa lämmitys- tai ilmastointisiirtimeltä palaavaa kaukolämpövettä ei johdeta käyttövesisiirtimelle (Rakennusten kaukolämmitys. 2013, 29).

Toisiopuoli

Toisiopuolella tarkoitetaan putkiston ja laitteiden osia, joissa virtaa lämmönsiirtimessä lämmitetty neste tai joihin sen paine vaikuttaa (Rakennusten kaukolämmitys 2013, 2).

Välisyöttökytkentä

Kaukolämmityksen kytkentätapa, jossa lämmitys- tai ilmanvaihtosiirtimiltä palaava kaukolämpövesi johdetaan käyttövesisiirtimille jäähtymän parantamiseksi (Rakennusten kaukolämmitys 2013, 29).

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Vuodesta 1940 jalansijaa kasvattanut kaukolämpö on vakiinnuttanut paikkansa Suomen tavallisimpana lämmitysmuotona. Nykyään kaukolämpöön luottaa reilut 2,7 miljoonaa suomalaista, eli se on ylivoimaisesti suosituin lämmitysratkaisu. Vaikka kaukolämmöllä on jo pitkät perinteet, muotoutuu ala ja sen tekniikka vielä pitkään sekä hioutuu kehittyvien sääntöjen ja määräyksien johdattelemana yhä energiatehokkaammaksi kokonaisuudeksi.

Vaikka rakennusten energiatehokkuus on ollut tavoitteena jo pitkään, on siinä edistytty 2010 – luvulla merkittävästi. Lähes nollaenergiatalot tekevät kovalla vauhdilla tuloaan ja pakollisiksi säädettyt rakennusten E-luvut ovat pakottaneet niin arkkitehteja, LVI-suunnittelijoita kuin myös energiateollisuutta vastaamaan nykyaikaisiin vaatimuksiin yhä paremman energiatehokkuuden saavuttamiseksi.

Kehityksen tarpeeseen vastasi myös Energiateollisuus ry, joka julkaisi vuonna 2013 kokoelman ”K1, Rakennuksen kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet”. Julkaisu pitää sisällään nimensä mukaisesti alalla sovellettavia ohjeistuksia sekä määräyksiä. Vuoden 2014 alussa voimaan astuneen julkaisun tarkoituksena on määritellä kaukolämmityslaitteille, niiden suunnittelulle sekä asennukselle perusvaatimukset ja taata kaukolämpöjärjestelmien toiminnan tehokkuus (Rakennusten kaukolämmitys 2013, 1).

Yksi tehokkaan kaukolämmitysjärjestelmän peruspilareista on jo pitkään ollut oikean asiakaskytkentätavan valinta. Kierrättämällä patterilämmitysverkon lämmönsiirtimeltä lämpimänä palaavaa kaukolämpövettä käyttövesivaihtimen kautta, on käyttevettä saatu esilämmitettyä. Näin pystytään hyödyntämään muutoin käyttämättä jäävää lämpöenergiaa. Tällaisilla suurissa kiinteistöissä suosituilla välisyöttökytkennöillä on parannettu kaukolämmön hyötysuhdetta ja parannettu kaukolämpöveden jäähtymää.

Julkaisun K1/2013 keskeinen osa ovat muutetut lämmönsiirtimien mitoituslämpötilat, joista suurimmat muutokset koskevat uudiskohteiden radiaattorilämmityksen toi-

siopuolta. Julkaisussa menoveden lämpötila on pudotettu 70 celsiusasteesta 45 asteeseen ja paluuveden lämpötila 40 asteesta 30 asteeseen. Lasketun lämpötilatason lisäksi asiakaslaitteiden hyötysuhdetta on pyritty kasvattamaan kiristämällä lämmön-siirtimiltä vaadittua asteisuutta viidestä kolmeen asteeseen.

Julkaisun K1/2013 myötä tulleet muutokset ovat johtaneet tilanteeseen, jossa välisyöttökytkennän mielekkyyttä on alettu pohtimaan sekä opinnäytetyön toimeksiantajana toimiva Jyväskylän Energia että lämmönsiirrinvalmistajat. Toimeksiantaja on havainnut uudiskohteissaan viitteitä siitä, että uusilla mitoituslämpötiloilla välisyöttökytkentä ei kaikissa tapauksissa välttämättä paranna jäähtymää vaan pahimmassa tapauksessa voisi jopa huonontaa sitä. Jyväskylän Energian ja konsernin yhteistyökumppaneiden kiinnostus aihetta kohtaan johti tähän opinnäytetyöhön.

1.2 Työn tavoite

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia välisyöttökytkennän vaikutuksia kaukolämpöveden jäähtymään julkaisun K1/2013 lämmönsiirtimien mitoituslämpötiloilla sekä vertailla lämmönjakokeskuksen hinnan muodostumista välisyöttökytkennällä ja ilman välisyöttökytkentää. Työn perimmäisenä tarkoituksena voidaan pitää kaukolämpöverkon asiakaslaitteiden jäähtymän optimoinnin kautta saavutettavaa kaukolämpöverkon toiminnan tehostamista sekä sen mahdollistamaa tuotanto- sekä pumppauskustannusten optimointia. Tälle opinnäytetyölle ja sen tuloksille voidaan selkeästi osoittaa neljä potentiaalista hyötyjää, joita ovat

1. kaukolämpöverkko
2. Rauhalahden voimalaitos
3. Keljonlahden voimalaitos
4. kaukolämpöasiakkaat

Kaukolämpöverkko hyötyy jäähtymän paranemisesta alentuneiden pumppauskustannusten sekä pienemmän vesivirran muodossa. Tästä on kerrottu lisää luvuissa 6.2 – 6.3. Rauhalahden voimalaitos puolestaan pystyy kasvattamaan savukaasupesurin tehoa, mikäli laitokselle palaava vesi on viileämpää. Tästä on kerrottu lisää luvussa 7.2. Keljonlahden voimalaitos pystyy kasvattamaan sähköenergian tuotantoaan, tästä kerrotaan lisää luvussa 6.1. Kaukolämpöasiakkaat hyötyvät jäähtymän paranemisesta

Jyväskylän Energian hinnoittelun mukaisen paluuviesmaksun muodossa. Tästä kerrotaan tarkemmin luvussa 8.2.

1.3 Aiheen rajaus

Opinnäytetyön tutkimus rajattiin käsittelemään Jyväskylän Energian kaukolämpöverkkoa ja siihen liitettyjen kiinteistöjen lämmönjakokeskuksia. Opinnäytetyötä ja sen tuloksia on kuitenkin varauksin mahdollista soveltaa myös muihin saman kokoluokan kaukolämpöverkkoihin.

Uusien mitoituslämpötilojen voimaan astumisajankohta 1.1.2014 asetti tutkimuksen pääotannan käsittelemään vuonna 2014 ja sen jälkeen valmistuneita kerrostaloja ja liikekiinteistöjä. Omakoti-, pari- ja rivitalot rajattiin pois kahdesta syystä. Välisyöttökytkentää suositellaan käytettäväksi vain, jos tilojen lämmitystehontarve on yli 30 kW tai käyttövesiteho on yli 120 kW ja lämmitys- tai iv-siirtimeltä palaavan kaukolämpöveden lämpötilassa on vielä hyödynnettävää jäähtymän parantamiseksi. (Rakennusten kaukolämmitys 2013, 29–30.) Lisäksi haettaessa tuntuvaa vaikutusta koko verkkoon on pienten kohteiden merkitys koko kaukolämpöverkossa hyvin marginaalinen. Käytännössä pienkohteiden rajaus otannasta tapahtui asettamalla kohteita hakiessa tilausviesvirran vähimmäisarvoksi yli 0,6 m³/h.

1.4 Tutkimusote ja tutkimuskysymykset

Opinnäytetyö toteutettiin kvantitatiivisena kehittämistutkimuksena. Tällä tutkimustavalla pyrittiin kehittämistutkimukselle tunnusomaisesti parantamaan olemassa olevaa toimintaa, tässä tapauksessa Jyväskylän Energian kaukolämpöverkon toimintaa. Kehittämistutkimukselle luonteenomaista piirteitä ovat ongelmalähtöisyys sekä tavoitteellisuus, jotka kuvaavat myös opinnäytetyön lähtökohtia erinomaisesti.

Kvantitatiivisen eli määrällisen tutkimuksen tunnuspiirteisiin kuuluvat Heikkilän (2014) mukaan suuret tilastoyksikkömäärät, otannan suunnittelu ja tulosten ristiintaulukointi. Koska tämä tutkimus perustuu suuresta joukosta kerättyyn mittausdataan ja sen vertailuun, voidaan opinnäytetyön tutkimusotetta perustellusti kuvailla kvantitatiivisia piirteitä omaavaksi.

Kehittämistutkimuksen keskeinen ongelmanratkaisumenetelmä on purkaa tutkittava ongelma tutkimuskysymyksiksi, joihin vastaamalla muodostetaan ratkaisua varsinaiseen tutkimusongelmaan. Opinnäytetyölle muodostuivat seuraavat tutkimuskysymykset:

- Mikä on jäähtymän suuruus uusilla mitoituslämpötiloilla ilman välisyöttökytkentää?
- Mikä on jäähtymän suuruus uusilla mitoituslämpötiloilla välisyöttökytkennällä?
- Mikä on jäähtymän suuruus vanhoilla mitoituslämpötiloilla?
- Toteutuvatko uudet mitoituslämpötilat seuratuissa kohteissa?
- Mitä tuotannollisia etuja suuremmalla jäähtymällä saavutetaan?
- Mikä on kytkentätavan vaikutus lämmönjakokeskuksen hintaan?
- Miten asiakkaat hyötyvät jäähtymän kasvattamisesta?

1.5 Tietoperusta

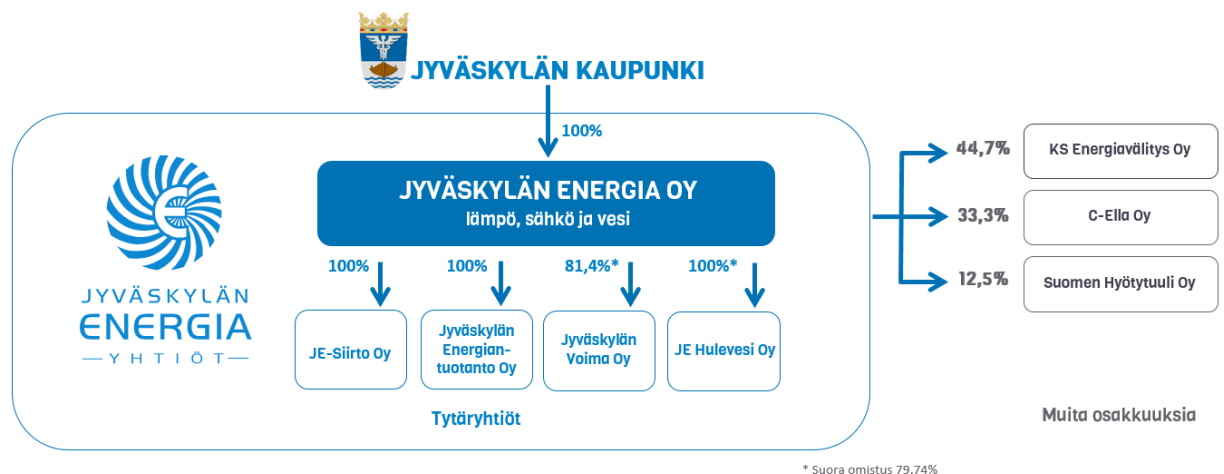
Opinnäytetyön tietoperusta perustuu valtaosin hyvin tunnettuihin laitteisiin ja ilmiöihin. Yleisten laitteiden, kuten lämmönsiirrinten ja savukaasupesurien osalta tietoperusta rakentuu useista eri kirjallisuus- ja internetlähteistä. Kohteiltaan spesifimpi tieto - esimerkiksi Rauhalahden voimalaitosta ja sen prosessilaitteita käsittelevä tieto on haettu kohteita käsittelevistä diplomi- ja opinnäytetöistä. Jälkimmäisessä tapauksessa on myös pyritty löytämään tiedon alkuperäinen lähde, jos se on ollut saatavilla. Muissa tapauksissa diplomi- ja opinnäytetöiden tietoon on suhtauduttava asiaankuulluvalla varauksella. Kirjallisuus- ja internetlähteiden ohella opinnäytetyössä on hyödynnetty sähköpostikyselyillä kerättyä tietoa laitteiden hintojen sekä toimeksiantajaa koskevien yksityiskohtien osalta.

Kaukolämpöön liittyvän teorian osalta työssä on suosittu suomalaista kirjallisuutta, sillä tutkimus käsittelee nimenomaan suomalaista kaukolämpöjärjestelmää. Kotimaista kirjallisuutta puoltaa suomalaisen kaukolämpöosaamisen taso, joka on tunnetusti maailman kärkiluokkaa. Kaiken kaikkiaan työssä on käytetty lähteitä erittäin monipuolisesti ja työn kannalta tärkeimpiä kokonaisuuksia on pyritty varmentamaan useammasta eri lähteestä.

2 Jyväskylän Energia Oy

2.1 Jyväskylän Energian konsernirakenne ja tunnusluvut

Työn toimeksiantajana toimii Jyväskylän Energia Oy. Jyväskylän kaupungin omistama yritys jakaantuu neljään tytäryhtiöön, joita ovat JE-siirto Oy, Jyväskylän Energiantuotanto Oy ja Jyväskylän Voima Oy (Tytär- ja osakkuusyhtiöt n.d.). Uutena tytäryhtiönä mukaan on tullut JE Hulevesi Oy. Yhteensä konsernin palveluksessa työskentelee 254 henkilöä (Yhteiskuntavastuuraaportti 2016). Kuviossa 1 on esitetty yhtiöiden omistusrakenne.



Kuvio 1. Jyväskylän Energian konsernirakenne ja osakkuudet (Henkilöstöinfo 12.3.2018)

Tytäryhtiöiden lisäksi Jyväskylän Energialla on omistusta seuraavista osakkuusyhtiöistä: KS Energiavälitys Oy (44,66 %), C-Ella Oy, (33,3 %) ja Suomen Hyötytuuli Oy (12,5 %)(Tytär- ja osakkuusyhtiöt n.d.). Vuonna 1902 perustettu yritys vastaa lämmön, veden ja sähkön jakelusta Jyväskylän alueella sekä myy sähköä valtakunnan verkkoon. Jyväskylän Energia Oy toimii konsernin emoyhtiönä ja sen toimitusjohtajana on Tuomo Kantola. (JE-yhtiöt n.d.) Vuonna 2016 Jyväskylän Energian liikevaihto oli 193,9 M€ (Yhteiskuntavastuuraaportti 2016).

2.2 Jyväskylän Energian voima- ja lämpölaitokset

Konsernin oma lämmön- ja sähköntuotanto perustuu kahteen vastapainevoimalaitokseen, jotka ovat vuonna 1986 valmistunut Rauhalahden voimalaitos ja vuonna 2010 käyttöönotettu Keljonlahden voimalaitos (Yhteiskuntavastuuraaportti 2016). Rauhalahden voimalaitoksen pääyksikkönä toimii 295 MW tehoinen leijukerroskattila. Järvisen mukaan kattila oli alun perin arinamallinen, kunnes Tampella Power muunsi sen leijukerroskattilaksi. Nykyisin pääpolttoaineina käytetään puuta ja turvetta. Pääkattilan (RAI1) lisäksi laitoksella on kaksi pienempää öljykäyttöistä kattilaa, jotka ovat 40 MW kaukolämpökattila (RAI4) sekä käynnistyshöyryä tuottava apukattila (RAI2). Aikaisemmin Fortumin osaomistuksessa ollut laitos toimitti aikanaan prosessihöyryä Kankaan paperitehtaalle. (Järvinen 2017, 6 – 7.) Rauhalahden voimalaitos tuottaa sähkötehoa noin 85 MW ja kaukolämpötehoa 200 MW. (Yhteiskuntavastuuraaportti 2016.)

Jyväskylän Energian uudempi yhteistuotantolaitos on Keljonlahden voimalaitos. Keljonlahden kattilassa poltetaan Rauhalahden tavoin pääpolttoaineina puuta ja turvetta. Yhteistuotantolaitokset tuottavat yhteensä 460 MW kaukolämpötehoa ja 248 MW sähkötehoa. Keljonlahden voimalaitos kykenee tarvittaessa tuottamaan noin 215 MW sähkötehoa lauhdeajossa, mikä nostaa sähköntuotannon huipputehon yhteensä 300 megawattiin. (Yhteiskuntavastuuraaportti 2016.)

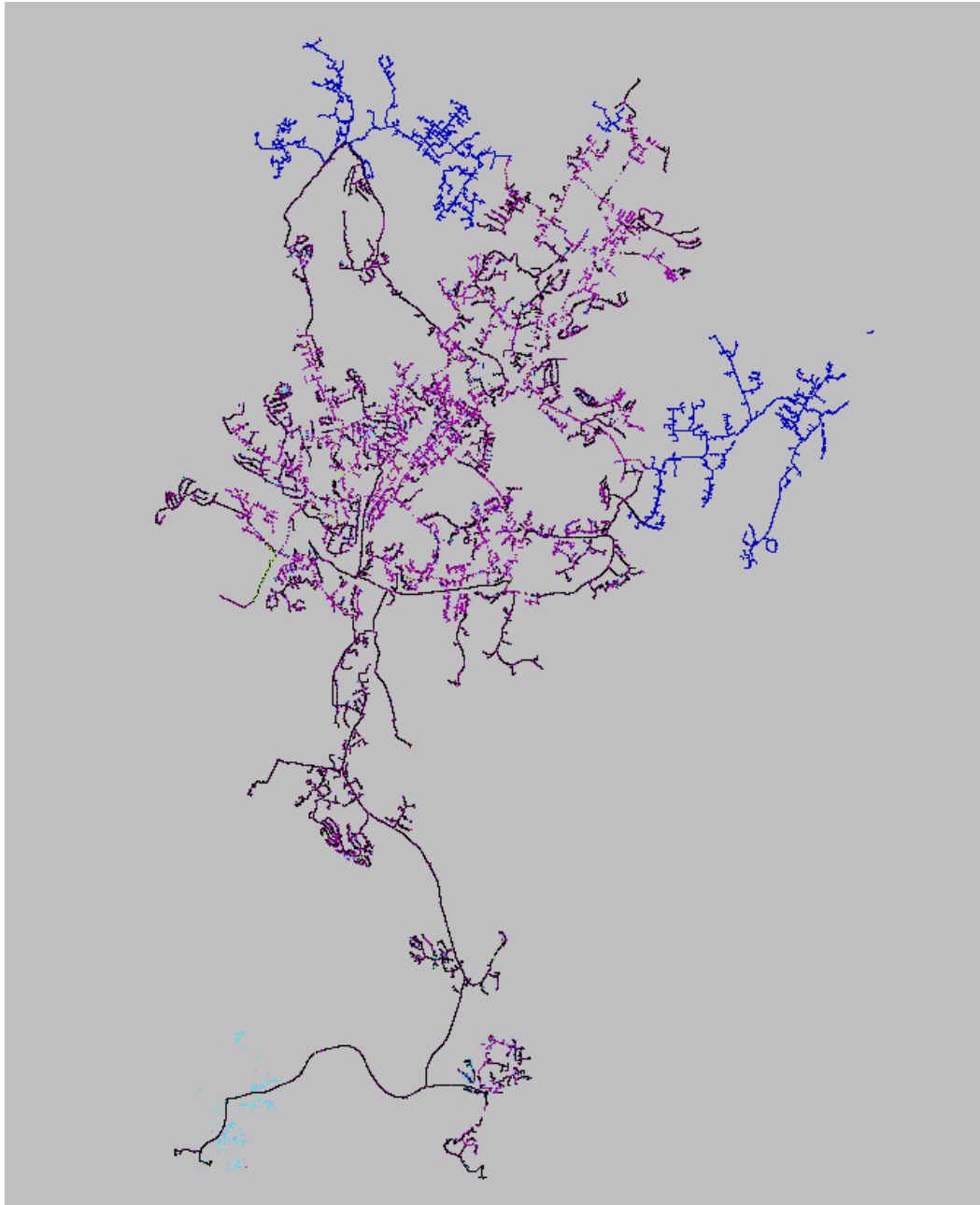
Kahden voimalaitoksen lisäksi Jyväskylän Energialla on kymmenen varalämpökeskusta, joista käytössä ovat Kuokkalan lämpökeskus, Varikon lämpökeskus, Savelan voimalaitos sekä Halssilan lämpökeskus. Kuokkalaan vuonna 1989 valmistunut lämpökeskus on kattilatyypiltään yhdistetty vesiputki-tuliputkikattila. Raskasöljykäyttöistä kuumavesikattilaa voidaan käyttää tehoalueella 10 – 40 MW. (Hakonen 2017.) Seppälänkankaan teollisuusalueella sijaitsevalla Varikon lämpökeskuksella on 40 MW:n kuumavesikattila. Raskasta polttoöljyä käyttävä kattila on tyypiltään yhdistetty vesiputki-tuliputkikattila. (Hakonen 2017.)

Savelassa sijaitseva voimalaitos koostuu neljästä raskasöljykattilasta, yhdestä turvekattilasta sekä kahdesta öljykäyttöisestä varakattilasta. Vuonna 1972 käyttöönotetun voimalaitoksen käyttö on vähentynyt ja osa kattiloista on poistettu käytöstä. Lämpökeskuskäytössä on kaksi vuonna 1992 valmistunutta Kvaerner Pulping Oy:n

valmistamaa vesiputkikattilaa. (Hakonen 2017.) Raskasta polttoöljyä käyttävät kattilat ovat yhteisteholtaan 80 MW. Halssilassa sijaitsevalla lämpölaitoksella on kaksi kevytöljykäyttöistä vesiputkikattilaa. Vuonna 1977 rakennettu lämpölaitos on yhteisteholtaan 5,7 MW. (Hakonen 2017.)

2.3 Jyväskylän Energian kaukolämpöverkko

Jyväskylän Energian kaukolämpöverkko on pituudeltaan 450 kilometriä, ja siihen on liittynenä 4803 asiakasta (Yhteiskuntavastuuraaportti 2016). Oman kaukolämpöverkon lisäksi Jyväskylän Energia myy lämpöä Elenian sekä Muuramen lämpö Oy:n hallinnoimiin verkkoihin. Kuviossa 2 on esitetty Jyvässeudun kaukolämpöverkko.



Kuvio 2. Jyväskylän kaukolämpöverkko. Elenian hallinnoimat verkko-osuudet on eroteltu sinisellä värillä ja Muuramen Lämpö Oy:n turkoosilla

3 Tutkimusasetelma

3.1 Tutkimusdata

Heikkilän mukaan kvantitatiivisella tutkimuksella voidaan selvittää lukumääriin pohjautuvia kysymyksiä sekä kartoittaa olemassa olevaa tilannetta. Kvantitatiiviselle eli

määrälliselle tutkimukselle ominaisesti opinnäytetyön tutkimusosuus perustuu suuresta joukosta kerättyyn tietoon ja kerätyn tiedon käsittelyyn. (Heikkilä 2014.) Opinnäytetyö eroaa perinteisestä kvantitatiivisesta tutkimuksesta aineiston puolesta. Usein määrällinen tutkimus pohjautuu erikokoisilta joukoilta kerättyihin lomakekyselyihin, kun tässä opinnäytetyössä aineisto koostuu mitatusta datasta. Opinnäytetyön ongelmanasettelun kannalta muodostui kaksi kiinnostavaa pääjoukkoa, jotka rajautuivat seuraavasti:

Uudet kohteet

Rakennukset, jotka ovat valmistuneet vuosina 2014 – 2016. Sijainti pääverkon alueella, tilausvesivirta vähintään 0,6 m³/h.

Vanhat kohteet

Rakennukset, jotka ovat valmistuneet vuosina 1995 – 2003. Sijainti pääverkon alueella, tilausvesivirta vähintään 0,6 m³/h.

Koska opinnäytetyössä ei käsitellä jokaista ehdot täyttävää kohdetta, on työ Heikkilän mukaan otantatutkimus. Sopivalle otoskoolle on olemassa joitain viitearvoja, ja Heikkilän mukaan suositeltavana vähimmäisarvona voidaan pitää sataa kappaletta, mikäli tuloksia käsitellään kokonaistasolla. (Heikkilä 2014.)

Uusien kohteiden kohdalla tutkimukseen päätyneiden kohteiden määrän sanelee soveltuvien kohteiden olemassa oleva määrä, eli noin 110 kappaletta. Vertailuryhmäksi kerättyjä vanhoja kohteita valittiin tutkimukseen sattumanvaraisesti noin sata kappaletta. Kaikista tutkimukseen valituista kohteista käytiin läpi kytkentäkaaviot, mahdolliset lämmönjakokeskuksen lopputarkastustodistukset sekä kulutustiedot. Vuoden 2017 tuntidatasta tutkittiin kaukolämpökohteiden tulo- ja paluuviesien lämpötilat, joiden keskiarvojen erotuksesta saatiin laskettua kohteiden keskimääräiset jäähtymät vuoden 2017 ajalta.

Tutkittavien kohteiden etsimiseen, rajaamiseen sekä valintaan käytettiin Jyväskylän Energialla käytössä olevaa Trimble NIS-verkkotietojärjestelmää. Järjestelmä pitää sisällään kaikki verkkoon liitetyt asiakaskohteet liitteineen karttapalveluun sijoitettuna. Kulutustietojen osalta tieto kerättiin EnerimEDM-energiadatajärjestelmästä. EDM-

järjestelmä pitää sisällään kaukolämpökohteiden kulutus- ja lämpötilatietoja liittymisnumeroiden avulla yksilöitynä. (ks. liitteet 1 ja 2.)

3.2 Tutkimusdatan käsittely

Kahdesta pää tutkimusjoukosta laadittiin Excel-taulukot, joihin kerättiin taulukossa 1 esitetyt tiedot kohteittain. Valmiista taulukoista kohteet jaoteltiin uudestaan kytkentätavan mukaan välisyöttökytkentää käyttäviin kohteisiin sekä peruskytkentää käyttäviin kohteisiin. Lopuksi ryhmiä vertailtiin kytkentätapojen, mitoituslämpötilojen ja jäähtymien perusteella. Vertailusta saatiin selville välisyöttökytkennän vaikutus jäähtymään uusilla lämmönsiirrinten mitoituslämpötiloilla sekä pyrittiin tunnistamaan mahdollisia muita jäähtymään vaikuttavia tekijöitä.

Taulukko 1. Tutkimuskohteista kerätty tieto

LIITYMÄNUMERO	OSOITE	KÄYTTÖKOHDE	KESKIARVO, 2017	
			T, MENO (°C)	T, PALUU (°C)
KYTKENTÄTAPA	TILAVUUSVESI VIRTA (m ³ /h)	SOPIMUSTEHO (kW)	JÄÄHTYMÄ (°C), LASKETTU	
SIIRRINVALMISTAJA	LVI- URAKOITSIJAJ	LVI- SUUNNITTELU	SIIRRINTEN MITOITUS, TOISIO (°C)	
			LS2	LS3 (LS4)

Tutkittavista kohteista pyrittiin selvittämään kaikki taulukossa 1 esitetyt asiat, mutta vähintään kohteen lämpötiloja, kytkentätapoja ja mitoitusta koskevat tiedot. Osa kerätystä tiedosta, kuten kohteiden suunnittelusta ja urakoinnista vastanneet yritykset, on opinnäytetyön päätavoitteen kannalta vähemmän relevanttia, mutta palvelevat toimeksiantajaa. Käyttökohteella selvennetään kohteen käyttötarkoitusta eli sitä, onko kyseessä esimerkiksi asunto-osakeyhtiö tai liiketila.

4 Kaukolämpö

Kaukolämmöllä tarkoitetaan keskitettyä lämmöntuotanto- ja jakelujärjestelmää, jossa lämmitysenergia tuotetaan keskitetysti lämpö- tai yhteistuotantolaitoksessa, josta se johdetaan kaukolämpöverkosta pitkin käyttäjille. Yksi kaukolämpöverkko voi käsittää kokonaisen kaupungin, sen osan, taajaman tai usean rakennuksen laajuisen kokonaisuuden. Suomessa valtaosa, noin 75 %, kaukolämmöstä tuotetaan CHP-laitoksissa eli sähköä ja lämpöä tuottavissa yhteistuotantolaitoksissa. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 12.)

4.1 Kaukolämmön hyödyt ja haitat

Kaukolämmön ylivoimaiselle suosiolle löytyy selvät perusteet, jotka voidaan jakaa viiteen osaan:

Energiatehokkuus: Yhteistuotantolaitoksilla päästään parhaimmillaan noin 85 - 90 %:n hyötysuhteeseen (Kaukolämpö on yhä useamman valinta 2017; Mäkelä & Tuunanen 2015, 12).

Ympäristöystävällisyys: kaukolämmöstä jo 37 % on hiilineutraalisti tuotettua ja trendi on kasvava. Kaukolämmön hiilidioksidipäästöt ovat laskeneet jopa 26 % tällä vuosikymmenellä (Energiavuosi 2017- Kaukolämpö 2018; Kaukolämpö on yhä useamman valinta 2017). Päästötekijät yhdistettynä yhteistuotannon korkeaan hyötysuhteeseen tekevät kaukolämmöstä ympäristöä säästävän valinnan.

Taloudellisuus: Vuonna 2017 kaukolämmön keskihinta oli 7,6 snt/kWh (Energiavuosi 2017- Kaukolämpö 2018). Esimerkiksi suoraa sähkölämmitystä käyttävät pientalot maksoivat sähköstään keskimäärin noin 13 snt/kWh (Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin 2017).

Toimintavarmuus: Kaukolämmön toimitusvarmuus lähentelee sataa prosenttia. Tämä tarkoittaa vuoden 2016 osalta sitä, että kaukolämpöasiakkaat jäivät ilman lämmöntoimitusta keskimäärin vain reiluksi kahdeksi tunniksi. (Kaukolämmön toimitusvarmuus hipoi viime vuonna sataa prosenttia 2017.)

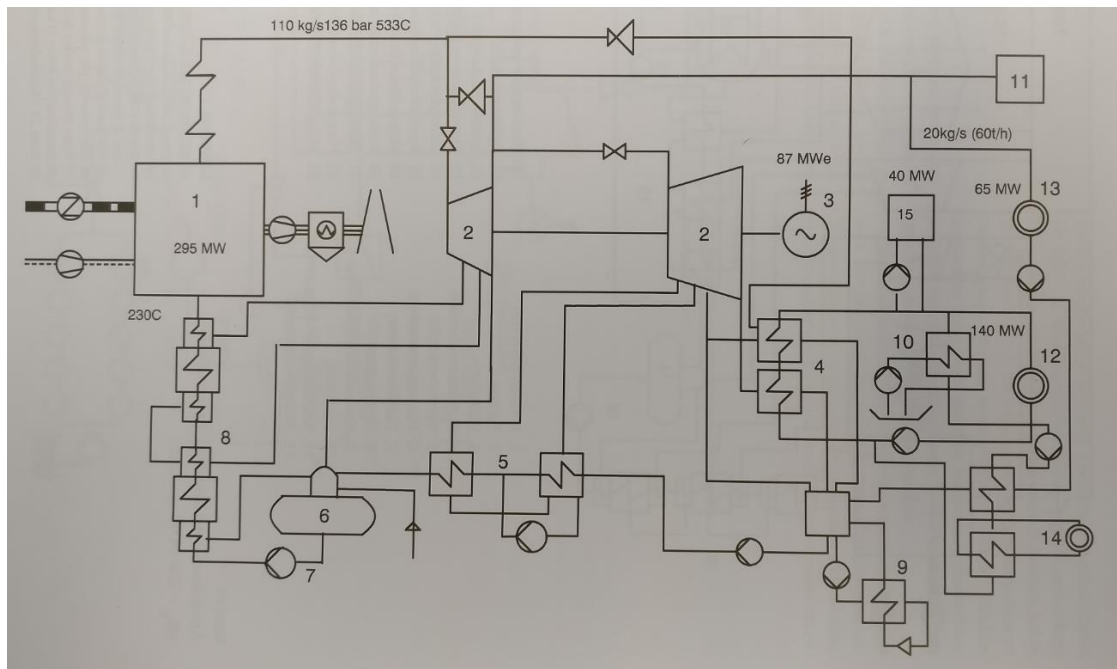
Käytettävyys: Kaukolämmitys ei edellytä käyttäjiltään operointi- tai kunnossapitotöitä. Asiakslaitteet ovat testattuja, varmatoimisia ja pitkäikäisiä.

Kaukolämpöön liittyy myös joitain ongelmia ja uhkatekijöitä. Kaukolämmitys vaatii suuria alkuinvestointeja, jotka voivat aiheuttaa hankaluuksia rahoituksen onnistumiseen ja jotka johtavat väistämättä pitkiin takaisinmaksuaikoihin. Vuodenajanvaihtelut tuovat oman haasteensa kaukolämmön tuottajille: ulkolämpötilan suuret vaihtelut johtavat myös kysynnän suureen vaihteluun. Tuotannon täytyy pystyä vastaamaan kaikkiin lämpötilaolosuhteisiin pysyen edelleen kannattavana.

Myöskään kuluttajien näkökulmasta kaukolämpö ei ole täysin ongelmaton: paikallisella energiayhtiöllä on hallussaan monopoliasemaa lähentelevä määräävä markkina-asema, joka voi näkyä asiakkaille epäterveenä kilpailuna. Kaukolämpöön sitoutuneen asiakkaan on taloudellisesti hankala vaihtaa lämmitysmuotoaan jättäen asiakkaan haavoittuvaiseksi kaukolämmön hinnan korotuksille.

4.2 Kaukolämmön tuotanto

Kaukolämpöä tuottavat laitokset voidaan jakaa karkeasti kahteen tyyppiin, joita ovat CHP-laitokset ja lämpökeskukset. Lämpöä tuottavat CHP-laitokset ovat vastapainevoimalaitoksia. Nimensä mukaisesti vastapainevoimalaitoksissa kaukolämpövesi lämmitetään turbiinin ulostulosta saatavalla vastapainehöyryllä. Vastapainevoimalaitoksen päätuote on lämpö, jonka tehontarpeen mukaan laitokset mitoitetaan. Harvinaisempia ovat niin sanotut väliotto- lauhdutuslaitokset, joiden primäärituotteena on sähkö, jonka ohella ne kykenevät lämmittämään myös kaukolämpövettä turbiinin väliottohöyryllä. (Koskelainen, Saarela, & Sipilä 2006, 297- 299.) Alla olevassa kuviossa 3 on esitetty Rauhalahden vastapainevoimalaitoksen prosessikuvaus, josta käy ilmi CHP-laitoksen yleisperiaate.



Kuvio 3. Rauhalahden vastapainevoimalaitoksen prosessikuvaus (Huhtinen ym. 2013, 61).

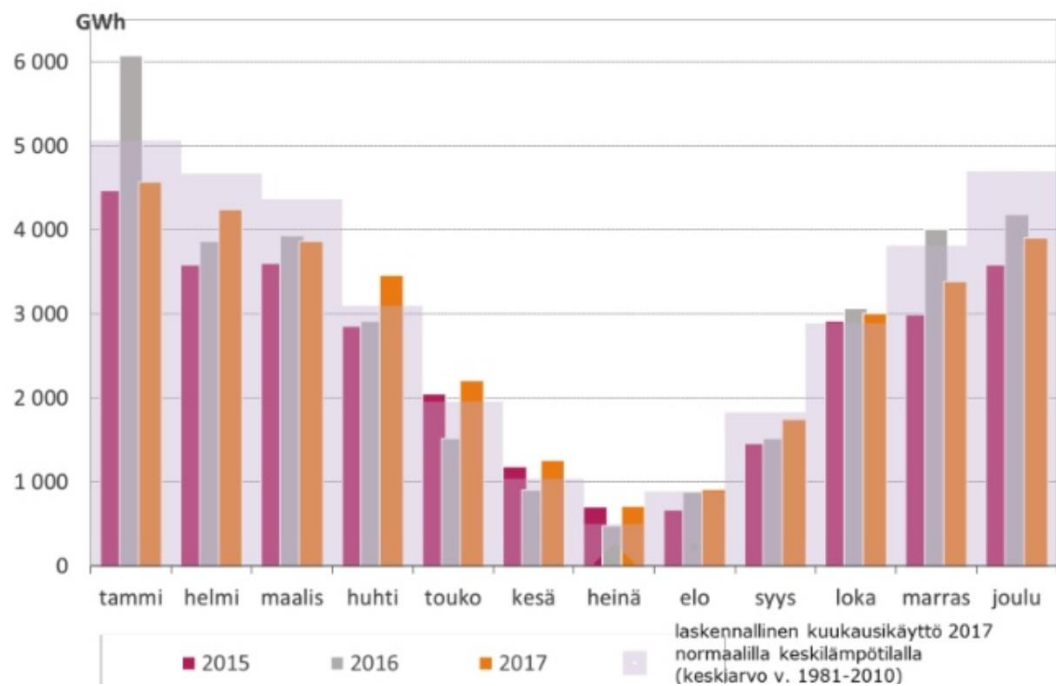
Huhtista ym. mukaillen, kuviossa 3. numeroidut laitteet ovat: (Huhtinen ym. 2013, 61).

1. Leijukerroskattila
2. Turbiini
3. Generaattori
4. Kaukolämpövaihtimet
5. Matalapaine-esilämmitin
6. Syöttövesisäiliö
7. Syöttövesipumput
8. Korkeapaine-esilämmittimet
9. Lauhteenpuhdistuslaitos
10. Apujäähdytin
11. Hörykattila
12. kaukolämmön käyttäjät
13. Höyryn käyttäjät
14. Kasvihuoneiden lämmitys
15. Kuumavesikattila

Lämpökeskukset pitävät sisällään polttotekniikaltaan ja polttoaineiltaan kaikki laitokset, joiden tuotteena on ainoastaan lämpöä. Mäkelä ja Tuunanen (2015, 25) jaottelevat lämpökeskukset käyttötarkoituksensa mukaan peruskuormalaitoksiin, varalaitok-

siin sekä huippukuormalaitoksiin. Koskelaisen ym. (2006, 282- 285) mukaan lämpökeskukset ovat kattilaratkaisuiltaan usein öljyä ja kaasua polttavia tulitorvikattiloita tai kiinteän polttoaineen arina- tai leijupetikattiloita

Kaukolämmön tuotantoa ohjaa kysyntä, jonka suuruus on riippuvainen ulkolämpötiloista. Lämpöenergian kysynnän vaihdellessa suuresti, täytyy taloudellisen tuotannon myös olla helposti muuntautuvaa. Yhteistuotannon korkean hyötysuhteen ansiosta suurin osa lämmöntuotannosta pyritään tuottamaan CHP-laitoksilla. Tätä kutsutaan perustehoksi. Kuvioista 4 ja 5 nähdään kaukolämmön kysynnän suhde pylväinä esitettyihin ulkolämpötiloihin.



Kuvio 4. Kaukolämmön käyttö kuukausittain (Energiavuosi 2017- Kaukolämpö. 2018).



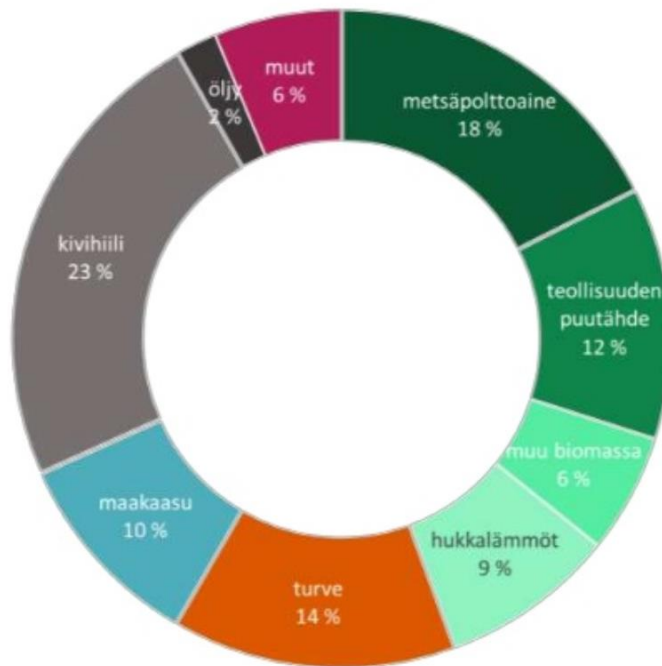
Kuvio 5. Vuoden 2016 keskimääräiset ulkolämpötilat kuukausittain, mittauspaikkana Jyväskylän lentoasema (Vuoden 2016 sää n.d.).

Höyryturbiinin ja generaattorin ominaisuuksien vuoksi CHP-laitokset toimivat parhaiten ja kustannustehokkaimmin täydellä teholla ajettuna, jolloin niiden käyttö tehon säätöön ei ole järkevää eikä taloudellista. Tähän tarkoitukseen soveltuvat niin kutsutut keskitehon laitokset, jotka ovat kiinteän polttoaineen kattiloita ja maakaasukattiloita. Keskiteholaitoksille ominaista on lähes katkeamaton käynti ja taloudellisesti kannattava osatehokäyttö.

Perus- ja keskitehon lisäksi lämmöntuottajien on huolehdittava myös huippu- ja varatehon kattamisesta. Huipputehoksi kutsutaan korkeimpia kulutuspiikkejä, jotka ilmenevät esimerkiksi kovimpina pakkasaamuina ilmastointikoneiden käynnistyessä. Huippu- ja varateholaitoksien on käyttötarkoituksesta johtuen oltava nopeasti ja varmasti käynnistyviä. Huipunkäyttöaikojen ollessa hyvin pieniä, polttoaineen hinnan merkitys putoaa ja tavoiteltavaksi piirteeksi muodostuu polttoaineen säilytyksen helppous (Kaukolämpö tuotetaan lähellä asiakasta. n.d.). Näistä syistä kyseisissä laistyypeissä suositetaan öljy- ja maakaasukattiloita.

Kuviossa 6 on esitetty suomalaisen kaukolämmön tuotannossa käytettävien polttoaineiden jakautuminen. Kuviosta näemme, että 36 % tuotannosta on hiilineutraalia.

Perinteisten fossiilisten polttoaineiden osuus on laskenut 35 prosenttiin. Merkittävää on kivihiilien osuus suurimpana yksittäisenä polttoaineena.



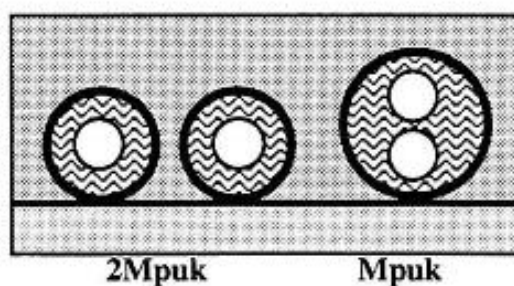
Kuvio 6. Kaukolämmön tuotanto polttoaineittain (Energiavuosi 2017- Kaukolämpö. 2018).

4.3 Kaukolämmön jakelu

Keskitetysti suurissa yksiköissä tuotettu kaukolämpö johdetaan lämpöenergiaa käyttäville asiakkaille siirtojohdoista, runkojohdoista ja talojohdoista koostuvaa kaukolämpöverkkoa pitkin. Mäkelän ja Tuunasan mukaan kaukolämpöverkon kustannukset lämmitysmuodon kokonaiskustannuksista on monella tapaa ratkaiseva: satojen putkikilometrien asennus maahan nostaa verkon kokonaiskustannukset usein koko järjestelmän suurimmiksi. Lisäksi kaukolämpöverkon toimintavarmuudelle ja käyttöiälle on kovat odotukset, koska taajama- ja kaupunkialueilla katujen alla sijaitsevat putket ovat hankalasti huollettavissa. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 50.)

Suomalainen suljettu kaksiputkijärjestelmä koostuu pareittain kulkevista tulo- ja paluuputkista. Koskelainen ym. (2006, 138) toteavat, että käytettyjä johtoja on muutamia erilaisia, mutta hallitsevaksi vaihtoehdoksi on vakiintunut kuviossa 7 esitetty, 1970-luvulla käyttöön otettu kiinnivaahdotettu polyuretaanieristeinen teräsputki. Niin kutsuttu Mpuk- tai 2Mpuk - johto on yhtenäinen, asennusvalmis elementti, jonka etuina ovat helppo valmistus ja asennettavuus. Kaikki kaukolämpöjohdot mitoitetaan 120 °C lämpötilalle ja 1,6 MPa paineelle. (Koskelainen ym. 137).

Termillä 2Mpuk tarkoitetaan yksiputkijohtoja, joissa yhden eristyskuoren alla on yksi virtausputki. Meno- ja paluuvien kattamiseksi näitä on asennettava samaan kaivantoon kaksi kappaletta. Mpuk puolestaan tarkoittaa kaksiputkijohtoa, jossa samaan eristeeseen on kiinnitetty sekä meno- että paluuviesiputki. Johtojen nimitys perustuu lyhenteisiin, joista "M" tarkoittaa muovista ulkokuorta, "pu" tarkoittaa polyuretaanivaahtoa ja "k" puolestaan merkitsee sitä, että putket ovat kiinni eristyksissä. (Koskelainen ym. 2006, 137.) Mpuk-johdon huonona puolena pidetään sitä, että meno- ja paluuputket ovat lähekkäin saman eristeen sisällä. Tämä voi osaltaan nostaa paluuvien lämpötilaa.



2Mpuk, Mpuk: (rak.vuodet 1976...)

Rakenne:

Polyeteenimuovisuojaputki

Eistemateriaali:

Polyuretaanivaahto

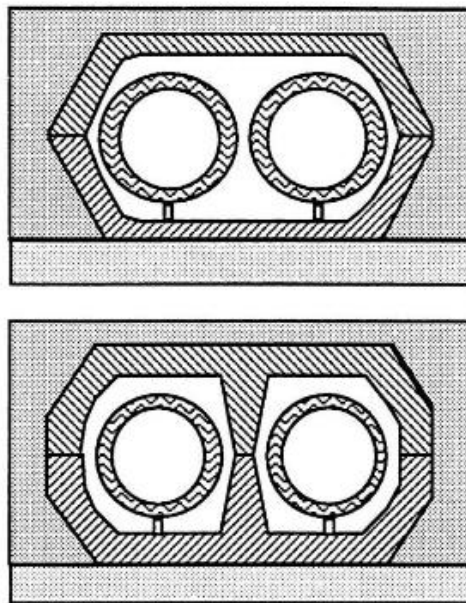
Virtausputket:

Teräs, putket kiinni eristyksessä

Kuvio 7. Havainnekuva Mpuk- ja 2Mpuk-johdoista (Kaukolämpöverkon suunnitelmallinen perusparantaminen. 2016).

1990-luvun alkuun asti asennettiin lisäksi betonikanavajohtoja, joissa virtausputket asennettiin kannattimien varaan betonikuoren sisään. Yleisin betonikanavista oli Emv

eli kokoelementtikanava, joka koostuu peräkkäin ladottavista, vetoteräksillä yhteen hitsattavista tehdasvalmisteisista betonikouruista, joiden sisään asennettiin mineraalivillalla eristetyt teräsputket. Betonikanavajohdoista luovuttiin sen valmistushinnan ja hitaan asennettavuuden takia. (Koskelainen ym. 2006, 144; Mäkelä & Tuunanen 2015, 59.) Kuviossa 8 on esitetty havainnekuva erilaisista betonikanavajohdoista.



Emv, Epu: (rakentamisvuodet 1960...)

Rakenne:

Kokoelementtikanava, muodostuu lähes samanlaisista ylä- ja alaelementeistä

Eristemateriaali:

Yleisimmin mineraalivillakouru, myös polyuretaanikouru (mahdl. myös kevytbetoni)

Virtausputket:

Teräs, liikkuva rakenne

Wmv:

Rakenne:

Kolmitukinen kokoelementtikanava

Eristemateriaali:

Yleisimmin mineraalivillakouru

Virtausputket:

Teräs, liikkuva rakenne

Kuvio 8. Havainnekuva betonikanavajohdoista (Kaukolämpöverkon suunnitelmallinen perusparantaminen. 2016).

Mäkelän ja Tuunanen (2015, 9) mukaan epäsuorassa kaukolämpöjärjestelmässä kaukolämpöjohtoja pitkin asiakkaalle tuotu kaukolämpövesi ei tule asiakkaan lämmityslaitteille asti, vaan se on erotettu asiakaslaitteiden vedestä lämmönvaihtimin. Koskelainen ym. toteavat, että kaukolämpövesi on erikoiskäsiteltyä vettä, josta on poistettu korroosiota aiheuttavat epäpuhtaudet sekä happi. Tämä käsittely mahdollistaa teräksen käytön kaukolämpöputkissa ilman ruostumisen pelkoa. (Koskelainen ym. 2006, 44.) Lisäksi kaukolämpövesi on keinotekoisesti värjättyä, jolloin mahdolliset vuodot on helposti paikallistettavissa.

4.4 Kaukolämmön asiakslaitteet

Kaukolämpöverkkoa pitkin tuotantolaitokselta johdettu lämpöenergia tuodaan asiakkaalle talojohtoa pitkin. Talojohto puolestaan päättyy asiakslaitteisiin, joihin Mäkelä ja Tuunanen (2015, 18) mukaan kuuluvat mittauskeskus sekä lämmönjakokeskus. Asiakslaitteiden tarkoitus on luovuttaa kaukolämpöveden lämpöenergia asiakkaalle, mitata asiakkaalta virtaavan veden määrää ja lämpöarvoa sekä lämpötiloja.

Mittauskeskus pitää sisällään laskijalaitteen, johon on kytketty virtausanturi sekä tulo- ja paluuviesilämpötilojen anturit. Mittauskeskuksen omistuksesta, hankinnasta ja huollosta vastaa alueen lämmönmyyjä. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 18.) Koskelaisen ym. (2006, 114) mukaan nykyaikaisista asiakasmittalaitteista on mahdollista saada lisäksi mittaustietoa tehosta, jäähtymästä sekä virtauksesta ja niiden huippuarvoista.

Lämmönjakokeskus puolestaan huolehtii lämmön siirtämisestä, säädöistä sekä pumppauksista. Tavallisesti lämmönjakokeskus pitää sisällään vähintään kaksi lämmönsiirrintä, toisen lämpimälle käyttövedelle ja toisen lämmityslaitteille. Siirtimiä voi olla useampia, jos kiinteistössä käytetään lisäksi esimerkiksi lattialämmitystä tai kaukolämpökäyttöisiä ilmastointilaitteita. Kuviossa 9 on esitetty esimerkki tehdasvalmiista lämmönjakokeskuksesta. Kyseinen keskus on lattialle asennettava kokonaisuus. Etualalla on nähtävissä mustat lämmönsiirtimet. Lämmönvaihtimien ominaisuuksista kerrotaan tarkemmin luvussa 5.



Kuvio 9. Esimerkki tehdasvalmiista lämmönjakokeskuksesta (Uusi lattialle asennettava DSE Flexd- lämmönjakokeskus. n.d.).

4.5 Kaukolämmön määräykset ja ohjeet

Kaukolämmön sujuvaan, taloudelliseen sekä yhtenäiseen toimintaan tarvitaan määräyksiä ja ohjeita. Energiateollisuus ry vastaa kaukolämmön osalta tähän tarpeeseen K1- julkaisuillaan. Näiden julkaisujen laatimisesta vastaa lämmönkäyttötoimikunta, joka koostuu suurten kaupunkien energiayhtiöiden edustajista sekä alan muista ammattilaisista. Julkaisua K1/2013 on ollut laatimassa yhdeksän henkilöä seitsemästä eri energiayhtiöstä ja yhdestä korkeakoulusta. Julkaisu pyrkii vastaamaan kasvavan sekä muuttuvan kysynnän tarpeisiin rajoittamatta alan kehitystä (Rakennusten kaukolämmitys 2013).

Vuoden 2013 julkaisu pitää sisällään merkittävän muutoksen, joka osaltaan on tämän opinnäytetyön taustana. Julkaisun yhtenä tavoitteena oli uudisrakennusten energiatehokkuuden parantaminen, johon ohjattiin laskemalla radiaattorilämmityksen menoveden suosituslämpötilaa merkittävästi. Alla olevassa taulukossa 1 on esitetty uudet lämmönsiirrinten mitoituslämpötilat.

Taulukko 2. Uudiskohteiden lämmönsiirrinten mitoituslämpötilat. (Rakennusten kaukolämmitys. 2013, 8).

	LÄMMÖNSIIRTIMIEN MITOITUSLÄMPÖTILAT °C			
	ENSIÖ		TOISIO	
	TULO	PALUU	PALUU	MENO
Lämmityksen lämmönsiirtimek, radiaattorilämmitys - suositus	115	33 (max)	30 (max)	45 (max)
Lämmityksen lämmönsiirtimek, radiaattorilämmitys - poikkeustapaukset	115	33 (max)	30 (max)	60 (max)
Lämmityksen lämmönsiirtimek, lattialämmitys	115	33 (max)	30 (max)	35 (max)
Kosteiden tilojen mukavuuslattialämmitys	70	28 (max)	25 (max)	30 (max)
Ilmanvaihdon lämmönsiirtimek	115	33 (max)	30 (max)	60 (max)
Huomautus		Ensiöpuolen paluulämpötila saa olla enintään 3 °C korkeampi kuin toisiopuolen paluulämpötila		

Taulukon 2 mukaan radiaattorilämmityksen suositeltu menolämpötila on enintään 45 °C ja erikoistapauksissa enintään 60 °C. Erikoistapauksiin lukeutuvat tilanteet, joissa suosituslämpötilan käyttö johtaisi osaltaan kohtuuttomiin radiaattoreiden ja putkistojen sijoittelu- ja asennusongelmiin (Rakennusten kaukolämmitys 2013, 8). Huomioitavaa on se, että radiaattoriverkkojen paluulämpötila saa olla enintään 30 °C ja siirtimek asteinuus enintään 3 °C. Erikoistapauksien huomion tarve on kasvanut uudisrakennuksissa korkeiden ikkunoiden yleistyttyä. Tämä trendi pakottaa radiaattoreista entistä matalampia, jolloin lämmönsiirtoala kutistuu, eikä tarvittavaa lämmönsiirto- tehoa saavuteta ilman menoveden mitoituslämpötilan korottamista.

Myös olemassa olevien kohteiden mitoitusarvoja kiristettiin hieman vuoden 2003 julkaisusta. Taulukossa 3 esitetyistä suosituksista on muutettu lämmönsiirrinten asteinuutta, joka on laskettu viidestä asteesta kolmeen asteeseen. Lisäksi lattialämmityksen toisiopuolen menolämpötilan suositusta on laskettu 45 asteesta 35 asteeseen.

(ks. taulukot 2 ja 3.) Huomioimisen arvoista on myös se, että 2013 julkaisussa mukavuuslattialämmitykselle on matalampi lämpötilataso. (Rakennusten kaukolämmitys 2013, 57; Rakennusten kaukolämmitys 2003, 7.)

Taulukko 3. Uudiskohteiden lämmönsiirrinten mitoituslämpötilat vuodelta 2003. (Rakennusten kaukolämmitys. 2003, 7)

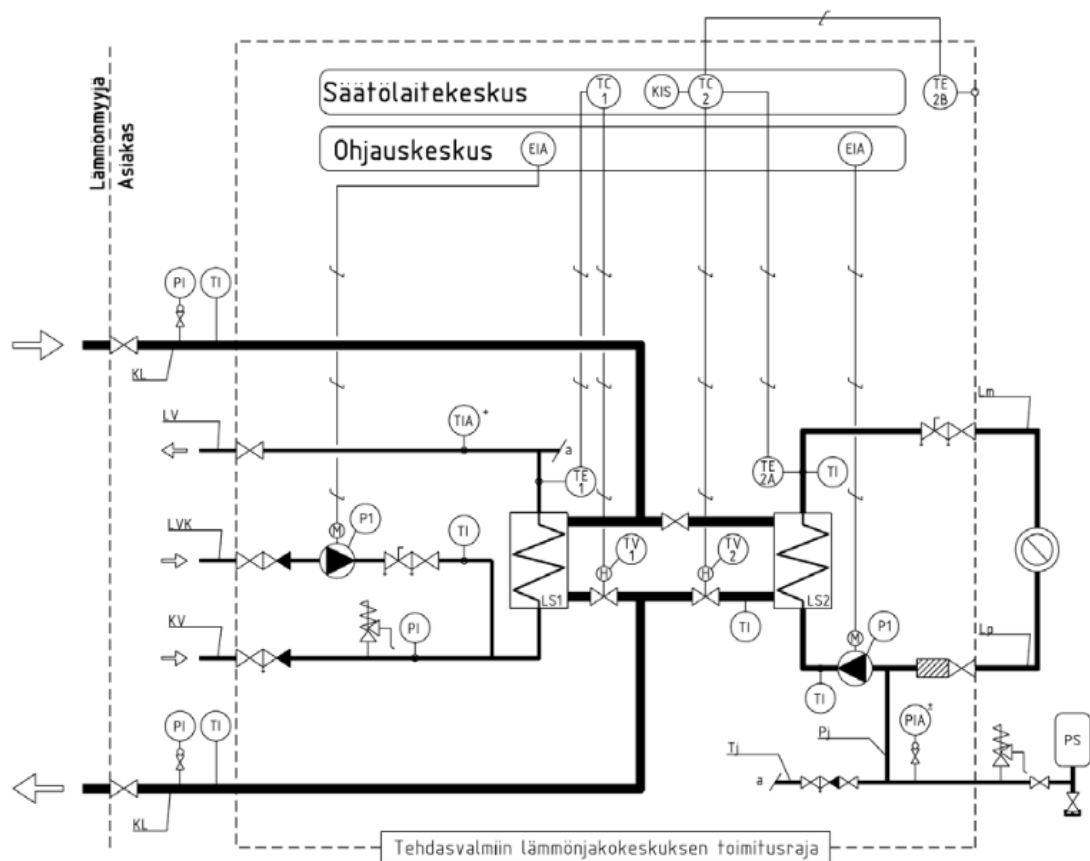
	LÄMMÖNSIIRTIMIEN MITOITUSLÄMPÖTILAT °C			
	ENSIÖ		TOISIO	
	alkulämpötila TULO	loppulämpötila PALUU	alkulämpötila PALUU	loppulämpötila MENO
Käyttöveden lämmönsiirtimet	70	enintään 25	10	55
Lämmityksen yms. lämmönsiirtimet mitoitusulkolämpötilassa	115	enintään 45	enintään 40	enintään 70
• lattialämmitys				enintään 45
Huomautukset (lämmityksen ja ilmanvaihdon lämmönsiirtimet)		Ensiöpuolen paluulämpötila saa olla enintään 5 °C korkeampi kuin toisiopuolen paluulämpötila		

4.6 Asiakslaitteiden kytkentätavat ja käyttöalueet

Kaukolämpöliittymän asiakaskytkentätapoja on muutamia erilaisia, ja tässä luvussa esitellään niistä tutkimustyön kannalta oleelliset. Mäkelä ja Tuunanen toteavat, että kytkentätavan valintaan vaikuttavat kohteen lämpötehot sekä painehäviöt. Oikealla kytkentätavalla pyritään takaamaan riittävä lämmönlaatu asiakkaalle sekä mahdollisimman hyvä jäähtymä lämmöntoimittajalle. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 67.)

4.6.1 Peruskytkentä

Opinnäytetyön alussa määriteltyä peruskytkentää käytetään tapauksissa, joissa rakennuksen lämmitystehontarve on yli 30 kW tai käyttövesitehon ollessa yli 120 kW. Tehosuositusten ylittyessä peruskytkentää suositellaan käytettäväksi vain, jos patteri- tai ilmanvaihtosiirtimeltä palaava kaukolämpövesi ei ole hyödynnettävissä käyttöveden esilämmitykseen. (Rakennusten kaukolämmitys 2013, 29.) Alla on esitetty esimerkki peruskytkennän kytkentäkaaviosta.

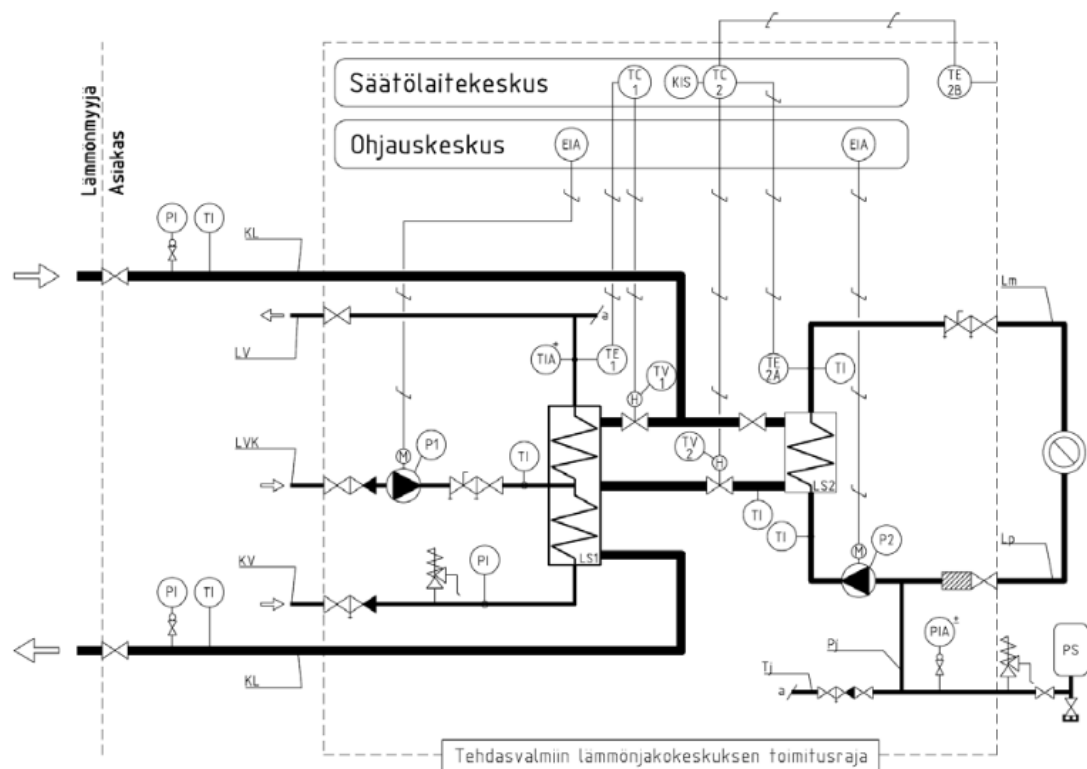


Kuvio 10. Esimerkki peruskytkennästä. (Rakennusten kaukolämmitys. 2013, 32)

PientalokytKentä muistuttaa valtaosin kuvion 10 peruskytKentää. Eroksi muodostuu laitteiden koko ja pientalokytKennöissä usein käytettävä lämpimän käyttöveden ta-saussäiliö. PientalokytKentää käytetään kohteissa, joissa peruskytKennän tehosuosi-tukset eivät täyty. Käytännössä pientalokytKentä käsittää omakoti- ja paritalot.

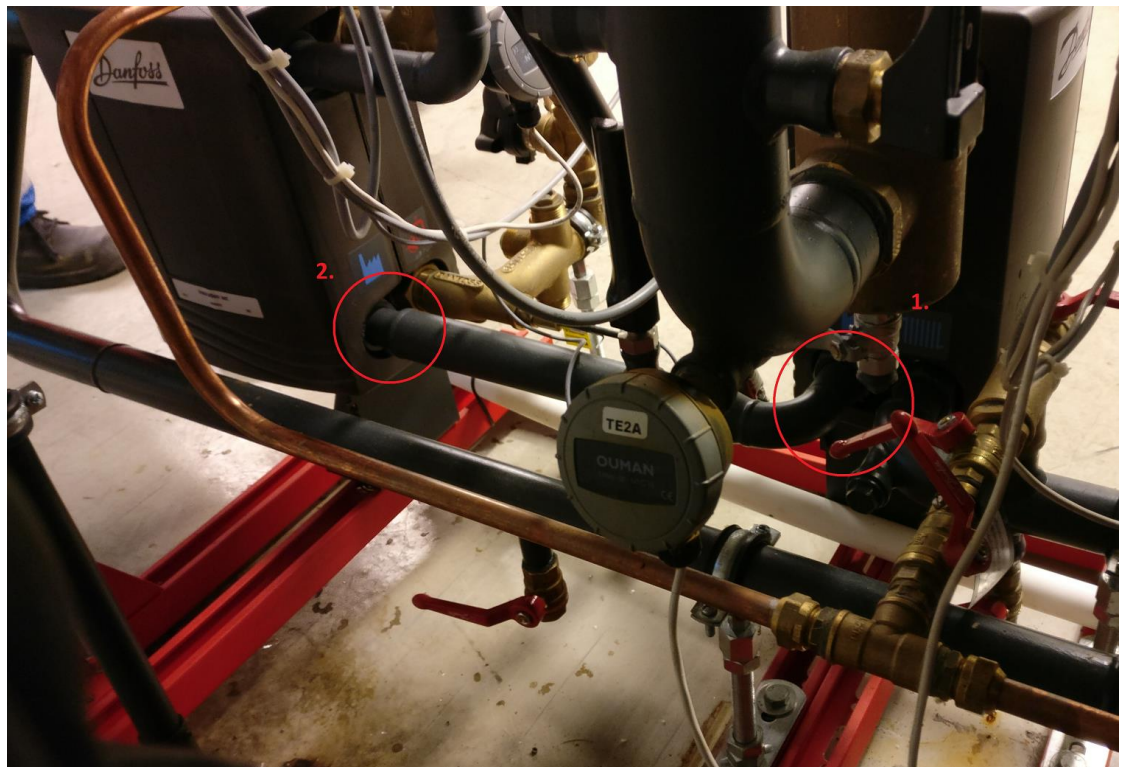
4.6.2 VälisyöttökytKentä

Opinnäytetyön alussa määritellyn välisyöttökytKennän käyttöalue on hieman moni-mutkaisempi: välisyöttökytKentää suositellaan käytettäväksi, mikäli käyttövesiteho ylittää 120 kW ja lämmitys- tai ilmavaihtosiirtimeltä palaavan kaukolämpöveden läm-pötila ylittää 45 °C. Jos lämmitys- tai ilmanvaihtosiirtimeltä palaavaan kaukolämpöve-den lämpötila on välillä 40 – 45 °C, suositellaan välisyöttöä käytettäväksi siinä ta-pauksessa, jos käyttövesisiirrin on teholtaan 300 kW tai sen yli. (Rakennusten kauko-lämmitys 2013, 29 – 30.) Alla on esitetty esimerkki välisyöttökytKennän kytKentäkaa-viosta.



Kuvio 11. Esimerkki välisyöttökytKennästä. (Rakennusten kaukolämmitys. 2013, 34)

Välisyötön toiminta on helposti havaittavissa kytkentäkaaviosta. Kuvion oikeassa laidassa sijaitsevalta lämmitysvaihtimelta LS2 kaukolämpövesi johdetaan käyttövesivaihtimille LS1, kun taas kuvion 10 peruskytkennässä vaihtimelta LS2 palaava kaukolämpövesi johdetaan suoraan paluuesilinjaan. (ks. kuviot 10 ja 11.) Kuvassa 1 on esitetty erään Jyväskylän Energian kaukolämpöasiakaskohteen välisyöttökytkentä käytännössä: kohdassa 1 on radiaattoriverkoston lämmönsiirrin, josta kaukolämpövesi syötetään kohti numerolla 2 merkattua käyttövesisiirrintä. Siirrinten lähtö- ja syöttöpisteet on ympyröity kuvaan.

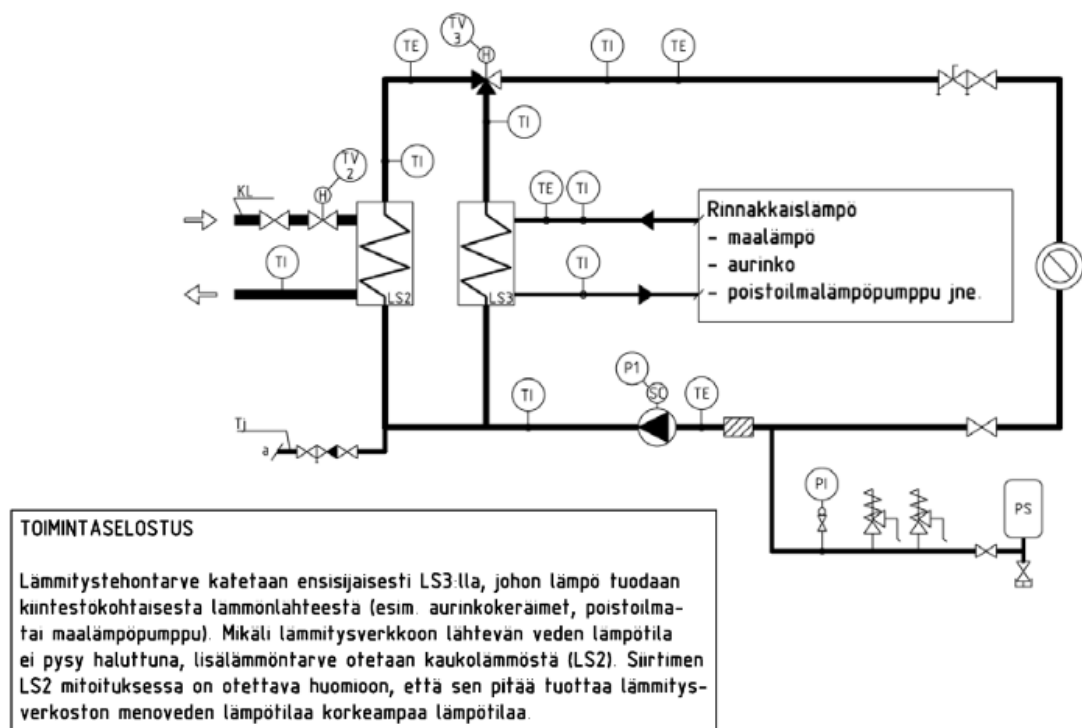


Kuva 1. Erään kaukolämpökohteen välisyöttökytkentä

4.6.3 Hybridikytkentä

Hybridikytkennällä tarkoitetaan tilannetta, jossa järjestelmään on kytketty kaksi tai useampia energianlähteitä tuottamaan lämpöä, jäähdytystä tai lämmintä käyttövettä

kiinteistöille tai teollisuuden prosesseille (Gerhard 2015, 181). Kaukolämpösovelluksissa hybridikytkentä tarkoittaa käytännössä sitä, että kiinteistön lämpöverkkoon on kaukolämmön rinnalle yhdistetty jokin muu lämmönlähde. Rinnalle kytkettävä lämmönlähde voi olla esimerkiksi aurinkokeräin, maalämpö, ilmalämpö - tai poistoilmalämpöpumppu. Kuviossa 12 esitetty esimerkkikuva hybridikytkennästä, jossa lämmitysverkkoon on kytketty rinnakkainen lämmönlähde.



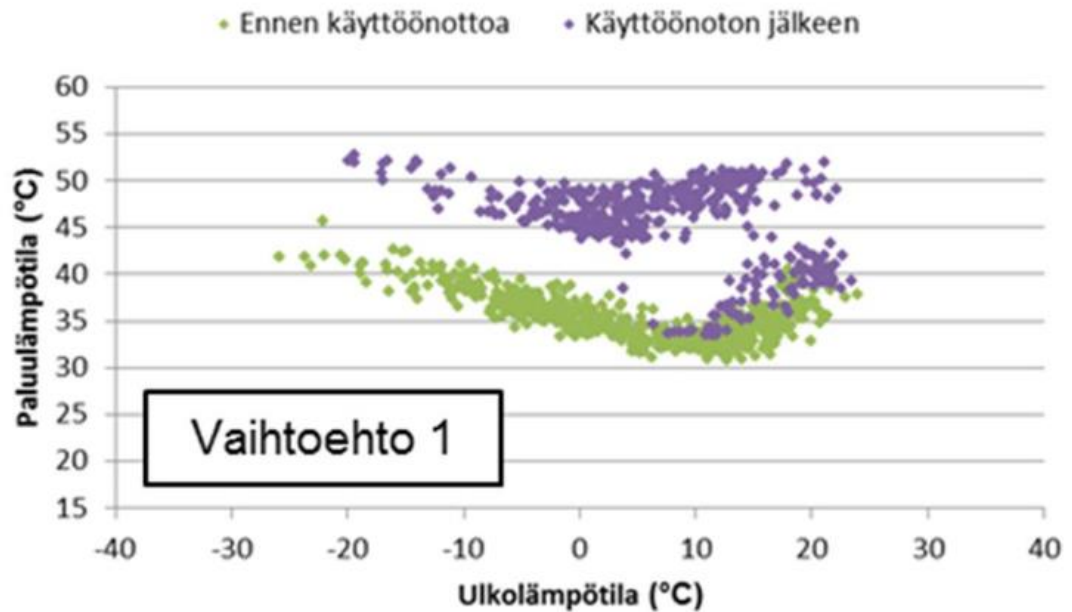
Kuvio 12. Esimerkki hybridikytkennästä. (Rakennusten kaukolämmitys. 2013, 89)

Hybridikytkennällä tavoitellaan edullisten ja ekologisten lämmitysmuotojen osittaista hyväksikäyttöä kaukolämmön rinnalla. Asiakkaan näkökulmasta nämä edut usein toteutuvat: kaukolämmön osuutta lämmityksessä saadaan vähennettyä monissa tapauksissa jopa puoleen (Rämä, Niemi & Similä 2015, 1). Hinnittelumallista riippuen hybridikytkennällä on saavutettavissa taloudellisia säästöjä energia- ja huipputehomaksujen osalta.

Rämän ym. mukaan lämmöntuottajan näkökulmasta tilanne on usein kaukolämpöasiakkaaseen verrattuna päinvastainen: hybridilämmityskohteet kuluttavat vähemmän lämpöä verkon häviöiden ja huoltokustannusten pysyessä ennallaan. Kulutuksen väheneminen ajoittuu usein käyttöajallisesti niin, että yhteistuotannon huipunkäyttöaika vähenee ja erillistuotannon käyttöä on lisättävä. (Rämä ym. 2015, 6-7.) Kytkeäntavasta ja säädöistä riippuen hybridikytkentä usein myös heikentää jäähtymää, millä on useita negatiivisia vaikutuksia lämmöntuottajalle. Jäähtymän vaikutuksia lämmöntuottajalle on kuvailtu tarkemmin luvussa 6.

Gerhard (2015, 183) toteaa, että hybridikytkennän haasteita ovat toimivan säädön monimutkaisuus, suuret investointikustannukset sekä matalan lämpötason lämmönlähteitä käytettäessä lämpimän käyttöveden priimauksen tarve. Helenin ohje kertoo, että priimauksen tarvetta voi esiintyä varsinkin käytettäessä poistoilmalämpöpumpua, joka ei kykene tuottamaan säätökäyrän vaatimaa lämpötilatasoa (Helenin ohje hybridikytkennästä asiakkaan kaukolämpölaitteiston rinnalle 2015). Tällöin viileä vesi on priimattava kaukolämmöllä, jolloin kaukolämpösiirtimeltä vaaditaan lämpimämpää menovettä, kun säätökäyrän asetus vaatisi.

Hybridikytkentä on toteutettava aina kuviota 12 mukaillen rinnankytkennällä niin, ettei lämmitysverkon paluuvesi lämpene ennen kaukolämpösiirrintä. Tällä tavoin pyritään minimoimaan hybridikytkennän negatiiviset vaikutukset jäähtymään laske- malla vain kulutusta eikä jäähtymää. (Rämä ym. 2015, 4; Helenin ohje hybridikytkennästä asiakkaan kaukolämpölaitteiston rinnalle. 2015.) Kytkeäntamallia ei ole kuitenkaan alusta asti noudatettu: jälkiasennettujen poistoilmalämpöpumppujen yleisty- essä tehtiin jonkin verran nykyään kiellettyjä sarjaankytkentöjä. Sarjaankytkentää on Rämän ym. (2015, 3) mukaan suosittu, sillä sen avulla lämpöpumpuista saadaan rin- nankytkentään verrattuna enemmän hyötyä jäähtymän kustannuksella. Alla olevassa kuviossa 13 on esitetty sarjaankytketyn PILP:in vaikutuksia jäähtymään. Kuviosta näh- dään, että muutos paluuveden lämpötilan kasvuun on merkittävä.



Kuvio 13. Sarjaankytketyn hybridijärjestelmän vaikutus jäähtymään. (Rämä ym. 2015, 26).

5 Lämmönsiirtimet

Lämmönsiirtimiä käytetään, kun halutaan siirtää lämpöenergiaa ainevirrasta toiseen sekoittamatta ainevirtoja keskenään. Perusajatuksena lämmönsiirtille johdetaan aina kaksi eri virtaa: lämmin virta, joka luovuttaa lämpöä ja kylmä virta, joka vastaanottaa lämpöä. Materiaalista ja tyypistä riippuen lämmönsiirtimiä voidaan käyttää erilaisten kaasujen sekä nesteiden välillä.

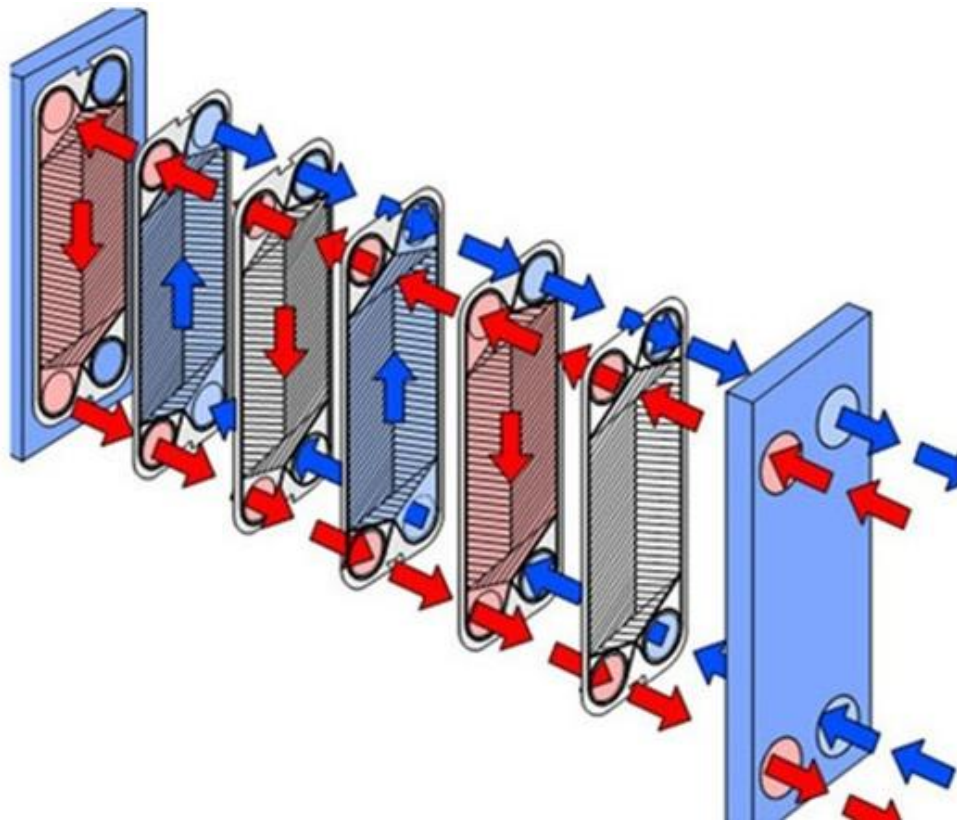
5.1 Lämmönsiirrintyypit ja niiden toiminta

Tavallisesti lämmönsiirtimet voidaan jaotella toimintaperiaatteensa mukaisesti kahteen ryhmään, joita ovat regeneratiiviset ja rekuperatiiviset siirtimet. Regeneratiiviset siirtimet perustuvat lämpöä varaavaan massaan, jota kylmä ja kuuma virtaus vuoron perään koskettavat. Rekuperatiivinen toimintaperiaate puolestaan perustuu lämmön

johtumiseen kylmän ja kuumen virran välillä olevan materiaalin läpi. (Kattilan lämmönsiirtimien rakenne ja toiminta. n.d.)

Koska nesteiden välisessä lämmönsiirrossa sekoittamattomuus on tärkeää, keskitytään tässä työssä tarkemmin vain jälkimmäiseen tyyppiin. Hongfei (2017, 225 - 227) jaottelee siirtimet rakenteen ja virtaussuunnan mukaan neljään alakategoriaan, joita ovat: myötävirtasiirtimet, vastavirtasiirtimet, ristivirtasiirtimet ja kompaktit monivirtasiirtimet.

Myötävirtasiirtimet perustuvat nimensä mukaisesti samansuuntaisiin virtoihin. Rakenteeltaan myötävirtasiirtimet ovat usein putki- tai vaippamallisia. Vastavirtasiirtimissä puolestaan lämpöä luovuttava ja vastaanottava virtaus kulkevat toisiaan vastaan. Rakenteeltaan vastavirtasiirtimet ovat usein samankaltaisia, kuin myötävirtasiirtimet. Kolmatta ryhmää edustavat ristivirtasiirtimet, jotka voivat rakenteeltaan olla vaippamallisia. Ristivirta perustuu lämpenevän ja jäähtyvän virran kohtisuorasta kohtaamisesta, joka saadaan aikaan esimerkiksi ohjauslevyillä. Tämän työn kannalta oleellisimpia ovat kompaktit monivirtasiirtimet, jotka ovat usein malliltaan levylämmönsiirtimiä. Vuoroin eripäin ladotut levyt mahdollistavat virtojen kohtaamisen jatkuvasti useista suunnista. (Hongfei 2017, 225 – 227.) Alla olevassa kuviossa on esitetty levylämmönsiirtimen toimintaperiaate. Kuviosta 14 nähdään, että siirrin koostuu vuoroin erisuuntiin ladotuista, muotoon prässätyistä virtauslevyistä.



Kuvio 14. Levylämmönsiirtimen toimintakuvaus (How does a heat plate exchanger work. n.d.).

Spencerin mukaan erilaisilla siirtimillä on omat hyötynsä ja heikkoutensa: siinä missä levylämmönsiirtimissä saavutetaan kokoon nähden suuri lämmönsiirtopinta-ala ja tätä kautta myös suuri lämmönsiirtoteho, ovat ne alttiita käytettävien fluidien epäpuhtauksille. Vaippa- ja putkilämmönsiirtimet puolestaan ovat vakiinnuttaneet paikkansa teollisuuden parissa. Vaikka teollisuuden suurilla putkivaihtimilla ei saavuteta yhtä suuria suhteellisia lämmönsiirtotehoja, voittavat ne kompaktit monivirtasiirtimet varmatoimisuudella ja monikäyttöisyydellään. (Spencer 2011, 153- 154, 199- 200.)

5.2 Kaukolämpöasiakkaan lämmönsiirtimet

Suomessa käytössä oleva epäsuora ja suljettu kaukolämpöjärjestelmä tarkoittaa sitä, että lämmitys- ja käyttövetenä ei käytetä kaukolämpövettä, vaan niille on omat vesipiirinsä. Tätä hydraulista erottamista varten asiakkaiden lämmönjakokeskuksissa on lämmönsiirtimet, joilla kaukolämpöveden lämpöenergia siirretään käyttöveteen ja lämmitysverkkoon. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 9.) Hydraulisella erottamisella saavutetaan useita hyötyjä, joista tärkeimpänä mainittakoon vesivahinkojen minimointi kiinteistöjen vesivuotojen yhteydessä. Esimerkiksi kiinteistön oman radiaattoriverkon paine- ja vesitilavuus ovat merkittävästi pienemmät verrattuna tilanteeseen, jossa radiaattorit olisivat kytkettynä suoraan kaukolämpöverkkoon.

Kuparikierukka- ja suoraputkisiirtimet ovat väistyneet nykypäivänä käytettävien vastavirtaperiaatteella toimivien juotettujen levylämmönsiirrinten tieltä. Ruostumattomasta- tai haponkestävästä teräksestä valmistetut levylämmönsiirtimet takaavat laajan tehoalueen pienistä ulkomitoista huolimatta, tehden niistä perustellun valinnan nykyisiin kompakteihin lämmönjakokeskuksiin. Pieni koko kostautuu pienessä vesitilavuudessa, mikä voi aiheuttaa säätöongelmia lämpötilojen vaihdellessa nopeasti. Siirtimen lämpöhäviöt on minimoitu kierrättämällä viileämpää nestettä siirtimen molemmissa päätyosissa, jolloin lämpimämpi neste pysyy ulkoiselta lämpötilalta paremmin eristettynä. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 70.)

5.3 Mitoitusperiaatteet

Lämmönjakokeskusten lämmönsiirtimien mitoituksessa pyritään kattamaan tarvittava huippulämmöntarve niin, että jäähtymä olisi mahdollisimman hyvä kaikissa käyttötilanteissa. Mitoitukselle on olemassa suositus- ja reunaehdot, joiden mukaan LVI-suunnittelijat tekevät omat laskelmansa perustuen kohteen lämmitystehontarpeeseen.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osa D1 asettaa käyttövesivaihtimen mitoitukselle omat vaatimuksensa. D1:n mukaan käyttövesisiirrin on mitoittettava niin, että lämminvesilaitteiston veden lämpötilan on oltava vähintään 55 °C. Mitoitusvirtaaman vähimmäisarvoksi on asetettu 0,3 dm³/s, joka vastaa siirrintehona 60 kilowattia. (Rakennusten kaukolämmitys 2013, 12.) Kupariputkia käytettäessä eroosiokorroosion

välttämiseksi virtausnopeus pyritään rajaamaan arvoon 0,5 m/s (Koskelainen ym. 2006, 72).

Lämmityksen ja ilmanvaihdon siirtimet mitoitetaan K1:n suosituslämpötiloja mukailen kattamaan suurimman mahdollisen lämmitystehontarpeen. Mikäli kohteessa käytetään jaksottaista lämmitystä, on seisontajaksoa seuraava tehohuippu myös ilmoitettava todellisena mitoitustehona. Ilmanvaihtosiirtimissä on huomioitavaa myös mahdollisten glykolivesiliuosten käyttö lämmönsiirron ja liuoksen ominaisuuksien osalta. (Rakennusten kaukolämmitys 2013, 12; Koskelainen ym. 2006, 72.)

6 Jäähtymä

Tässä luvussa on esitetty kaukolämpöveden jäähtymän merkitystä energiayhtiölle, painopisteiden ollessa tuotantolaitoksissa sekä kaukolämpöverkossa. Luvussa on myös esitetty arvioita työn tavoitteena olevan jäähtymän parantamisen myötä säästettävissä olevista hyödyistä.

6.1 Jäähtymän vaikutus yhteistuotantolaitokseen

Jäähtymällä on suuria vaikutuksia yhteistuotantolaitoksen toimintaan ja erityisesti sähköntuotantoon. Vastapainevoimalaitoksen sähköteho on suoraan riippuvainen tuotetusta höyryvirrasta sekä kaukolämpöveden lämpötiloista. Vastapainevoimalaitoksissa kaukolämpö tuotetaan perinteisesti lauhduttamalla turbiinilta saatua vastapaine- ja väliottohöyryä kaukolämpösiirtimessä. Lauhtumispaine riippuu kaukolämpöveden lämpötiloista: lauhtumispaine alenee kaukolämpöveden lämpötilan alentuessa. Lauhtumispaineen merkitys puolestaan kiteytyy turbiinissa: lauhtumispaineen kasvu vaikuttaa käänteisesti turbiinissa vallitsevaan entalpiaeroon. Mitä alhaisempia kaukolämpöveden lämpötilat ovat, sitä paremmalla hyötysuhteella voidaan tuottaa sähköä. (Koskelainen ym. 2006, 298; Kaukolämpöjärjestelmän paluuveden hyväksikäyttö kiinteistöjen lämmityksessä 2010, 8-9.)

Koskelainen ym. tiivistävät kaukolämpöveden lämpötilojen nousun vaikutukset sähköntuotantoon seuraavasti: (Koskelainen 2006, 298).

- Paluuveden lämpötilan noustessa 1 °C vähentyy sähköntuotanto 0,2 %
- Menoveden lämpötilan noustessa 1 °C vähentyy sähköntuotanto 1 %

Energiateollisuus ry:lle laaditussa selvityksessä esitetään, että kaukolämpöveden lämpötilaa laskemalla sähköntuotannon voidaan olettaa kasvavan seuraavasti: (kaukolämpöjärjestelmän paluuveden hyväksikäyttö kiinteistöjen lämmityksessä 2010, 39).

- Paluuveden lämpötilan laskiessa sähköteho muuttuu 0,5 % /°C
- Menoveden lämpötilan laskiessa sähköteho muuttuu 0,1 % /°C

Sähköntuotannon kannalta edullisinta olisi siis laskea sekä meno että paluuvesien lämpötiloja, jolloin jäähtymä puolestaan pysyy vakiona. Pelkästään paluuveden lämpötilaa pudottamalla voidaan kuitenkin saavuttaa merkittävä puolen prosentin muutos sähköntuotantoon, vaikuttamatta tuotantolaitokselta lähtevän kaukolämpöveden lämpötilaan. Jyväskylän Energian kannalta esimerkiksi 1 °C lasku paluuvudessa näkyisi seuraavasti: Keljonlahden ja Rauhalahden voimalaitosten yhteenlaskettu sähköteho on 248 MW, josta 0,5 % kasvu tarkoittaisi vajaan 1,25 megawatin tehon lisäystä. Vuositasolla 8500 tunnin käyttöajalla tämä tarkoittaisi 10 540 MWh sähköntuotannon lisäystä. Arvioimalla sähkön hinnaksi esimerkiksi 50 €/MWh tämä toisi noin 530 000 euron vuosittaisen tulonlisäyksen. Laskelma on sinällään hyvin teoreettinen ja pitää sisällään oletuksen, että molemmat laitokset olisivat lähes ympärivuotisessa käytössä.

Ajettaessa voimalaitosta täydellä teholla, lisääntynyt sähköteho vähentää kaukolämpötehoa, mikä voi CHP-tuotannon tehosta riippuen johtaa erillistuotannon käyttöasteen nousuun (Kaukolämpöjärjestelmän paluuveden hyväksikäyttö kiinteistöjen lämmityksessä 2010, 9). Jyväskylän Energialla tätä ongelmaa ei kuitenkaan ilmene, sillä yhtiön voimalaitokset ovat nykyiselle käyttökapasiteetille reilusti mitoitettuja, eikä pulaa lämpöenergiasta näin ollen pääse syntymään, vaikka sähkötehoa haluttaisiin kasvattaa kaukolämpötehon kustannuksella.

6.2 Jäähtymän vaikutukset kaukolämpöverkkoon

Tuotantolaitosten ohella energiayhtiöiden suuri hyötyjä jäähtymän kasvusta on kaukolämpöverkko. Kaukolämpöveden jäähtymä on verrannollinen verkon tehokkuuteen ja sille voidaan osoittaa useita hyötyjä:

Lämpöhäviöt pienenevät. Kaukolämpöveden lämpötilan laskiessa lämpöhäviöt pienentyvät ja tätä kautta järjestelmän kokonaishyötysuhde paranee. Paluueden lämpötilaa alentamalla lämpöhäviöt pienentyvät 0,75 - 0,80 % / °C. (Anttonen 2011; Kaukolämpöjärjestelmän paluueden hyväksikäyttö kiinteistöjen lämmityksessä 2010, 9.)

Tarvittava vesivirta pienenee. Verkostoa rakentaessa voidaan käyttää pienempää putkikokoa ja vastaavasti olemassa olevaa putkikokoa ei välttämättä tarvitse kasvattaa verkon kasvaessa (ks. kuvio 15) (Kaukolämpöjärjestelmän paluueden hyväksikäyttö kiinteistöjen lämmityksessä 2010, 10).

Varastointikapasiteetti paranee.

Kaukolämpöakun kapasiteetti on suoraan verrannollinen tulo- ja paluulämpötilojen erotukseen. 5 °C alenema paluuedessä kasvattaa paineettoman kaukolämpöakun kapasiteettia 10 %. (Kaukolämpöjärjestelmän paluueden hyväksikäyttö kiinteistöjen lämmityksessä 2010, 9.)

Jäähtymän vaikutus kaukolämpötehoon voidaan laskennallisesti todentaa kaukolämmön tehonsiirtokyvyn kaavalla 1. (Koskelainen ym. 2006, 198).

$$\Phi = \varphi * q_v * c_p * \Delta t \quad (1)$$

jossa

Φ = kaukolämpöteho, kW

φ = veden tiheys, kg/d*m³

q_v = virtaama, dm³/s

c_p = ominaislämpökapasiteetti, kJ/kg*K

Δt = tulo- ja paluulämpötilojen erotus (jäähtymä), K

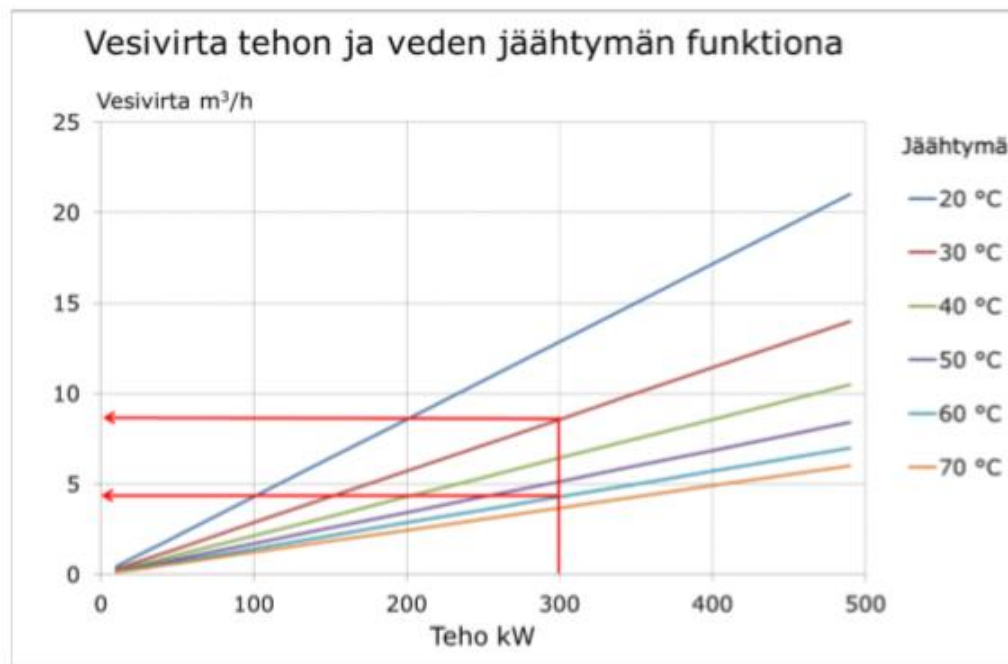
Kaavasta 1 nähdään, että kaukolämpöteho on riippuvainen vesivirtauksen lisäksi tulo- ja paluulämpötilojen erotuksesta eli jäähtymästä.

Lämpöhäviöiden osalta jäähtymän kasvu muuttaisi tilannetta seuraavasti: vuonna 2016 Jyväskylän Energian lämmönmyynti oli 1120 GWh. Saman vuoden verkostohäviöt olivat 8,3 %, mikä tarkoittaa lämmöntuotannon osuudesta 92 960 megawattituntia. (Yhteiskuntavastuuraaportti 2016.) Alentamalla paluueden lämpötilaa yhdellä asteella vähenee lämpöhäviöiden määrä parhaimmillaan 0,80 %, mikä tarkoittaisi noin

744:ää megawattituntia. Arvioimalla kaukolämmön tuotantokustannukseksi 35– 40 €/ MWh tarkoittaisi lämpöhäviöiden pieneneminen rahallisena säästönä noin 24 000 – 30 000 euroa vuodessa.

6.3 Jäähdytymän vaikutus pumppaustehoon

Jäähdytymä vaikuttaa merkittävästi myös kaukolämpöverkon pumppaustehon tarpeeseen ja pumppauskustannuksiin. Kuviosta 15 voi nähdä, että esimerkiksi 300 kW:n lämmitysteho 60 °C:n jäähdytmällä saavutetaan noin 4 m³/h:n virtaamalla, kun taas jäähdytymän ollessa 30 °C vaaditaan saman lämmitystehon saavuttamiseksi noin kaksinkertainen vesivirta.



Kuvio 15. Vesivirta tehon funktiona eri jäähdytymillä (Teho ja vesivirta kaukolämmön maksuperusteina, suositus, julkaisu K15/2014).

Kaukolämpöveden lämpötilan noustessa veden tiheys laskee, mikä johtaa virtausnopeuksien kasvamiseen ja painehäviöihin. Tämä puolestaan nostaa kaukolämpöpumpuilta vaadittavaa tehoa ja sähkönkulutusta. Kaukolämpöveden keskimääräisillä lämpötiloilla yhden asteen jäähtymä paluuedessä laskee vesivirtaa 2,6 %, mikä puolestaan laskee pumppauskustannuksia 5,5 %. (Kaukolämpöjärjestelmän paluueden hyväksikäyttö kiinteistöjen lämmityksessä 2010, 9) Ilmiö voidaan todentaa myös pumppaustehon kaavalla 2. (Koskelainen ym. 2006, 170).

$$P = \frac{q_v \Delta p}{\eta} = \frac{q_v \rho g H}{\eta} = \frac{\dot{m} g H}{\eta} \quad (2)$$

jossa

P = kaukolämpöpumpun akseliteho, kW

ρ = veden tiheys, kg/m³

q_v = virtaama, m³/s

Δp = paine-ero, Pa

g = putoamiskiihtyvyys, m/s²

H = nostokorkeus, m

\dot{m} = massavirta, kg/s

η = hyötysuhde

Jyväskylän Energian kaukolämpöverkon pumppaussähkönkulutus vuodelta 2016 oli yhteensä 7378 MWh (Yhteiskuntavastuuraaportti 2016). Sähkön hinnalla 50€ /MWh kaukolämmön pumppauskustannukset vuodessa olivat siis hieman alle 370 000 €.

Mikäli kaukolämmön keskimääräistä paluulämpötilaa pystytään laskemaan yhdellä asteella, realisoituisi muutos ylempänä esitetyn 5,5 % säästön mukaisesti laskemalla pumppauskustannukset hieman yli 350 000 euroon. Vuotuista säästöä kertyisi siis hieman yli 20 000 euroa.

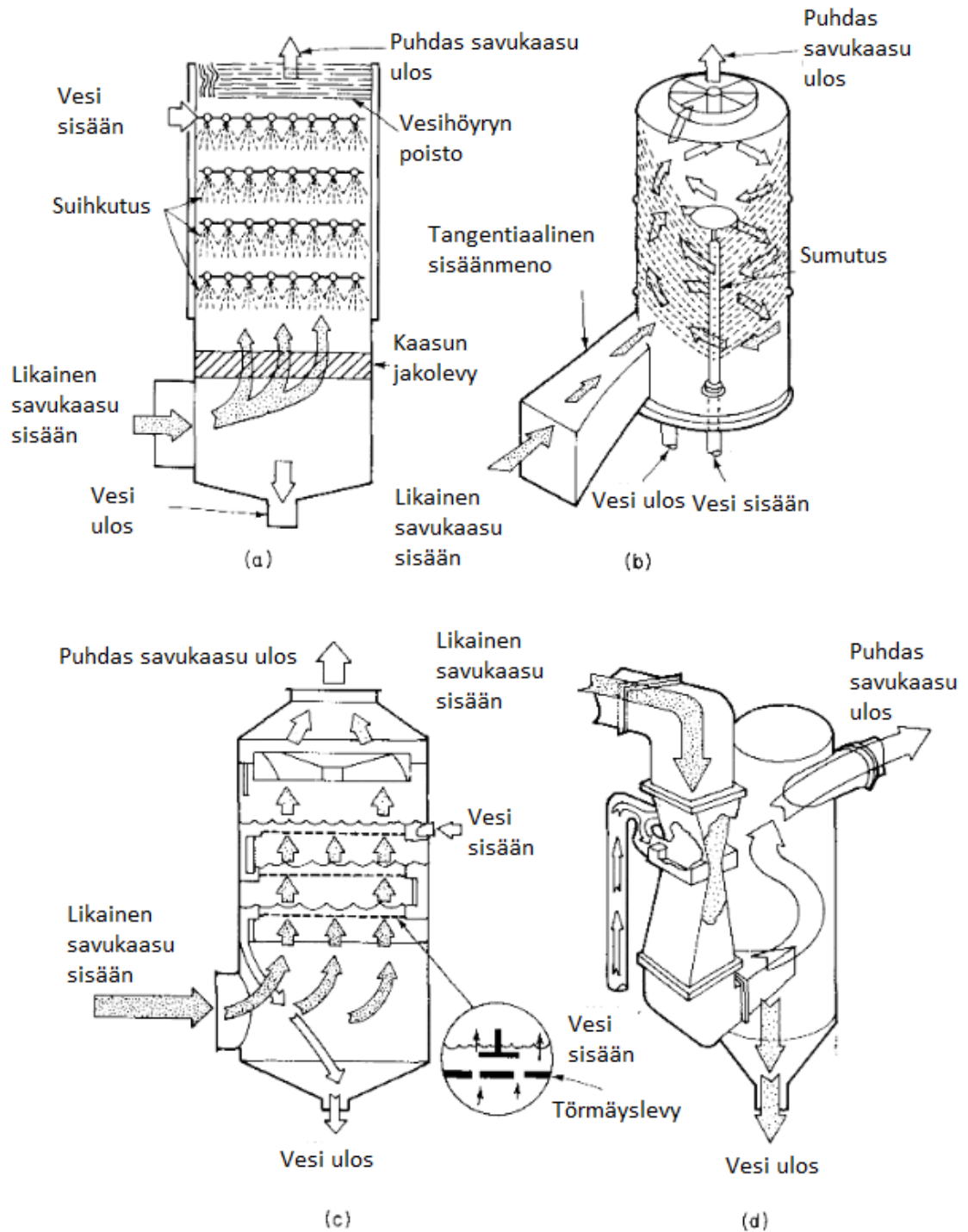
7 Savukaasupesuri

Savukaasupesuri on erittäin tärkeä osa nykyaikaista biovoimalaitosta. Savukaasupesuri eli niin kutsuttu märkäpesuri on kehitetty alun alkaen savukaasun hiukkaspäästöjen vähentämiseksi. Pian käyttöönoton jälkeen huomattiin, että päästöjen hallinnan ohella savukaasupesurilla voidaan ottaa talteen savukaasun mukana ulkoilmaan menevää ylijäämälämpöä. (Järvenreuna & Nummila n.d.)

Perinteisessä, ilman savukaasupesuria olevassa polttolaitoksessa piipusta ulkoilmaan nousee noin 150 °C:n lämpöistä savukaasua. Pesurilla varustetussa laitoksessa savukaasun lämpötila saadaan laskettua 50 °C:n tietämille eli hukkalämmöstä saadaan talteen noin 100 °C. Tämä tarkoittaa Rauhalahden voimalaitoksen kohdalla parhaimmillaan 40 MW tunnissa. (Savukaasupesuri minimoimaan Rauhalahden päästöt 2016.)

7.1 Savukaasupesurin toiminta

Maaskola (2002) jaottelee savukaasupesurit toiminnan ja käyttökohteen mukaan kolmeen pääryhmään: lämmöntalteenottopesurit, hiukkasten poistoon tarkoitetut pesurit sekä rikinpoiston pesurit. Flagan ja Seinfeld (1988, 456) puolestaan jakavat savukaasupesurit toimintansa perusteella karkeasti kahteen ryhmään: pesureihin, joissa puhdistettavaan virtaan kohdistetaan vesipisarasuihkua ja pesureihin, joissa puhdistettava virta ohjataan kostutetuille pinnoille. Kuviossa 16 on esiteltyä toiminnaltaan ja rakenteeltaan erilaisia savukaasupesureita.



Kuvio 16. Erityyppisten savukaasupesurin toiminta, muokattu: (a) pesutorni, (b) syklonipesutorni, (c) LTO-pesuri ja (d) venturipesuri. (Flagan & Seinfeld 1988, 458).

Pesureiden toiminta perustuu mahdollisimman suuren ja voimakkaan kosketuspinnan luomiseen puhdistettavan kaasun ja pesunesteen välille. Tämä toteutetaan

yleensä hajottamalla pesuneste pieniksi, halkaisijaltaan noin 0,1 -1,0 millimetrin kokoisiksi pisaroiksi, minkä jälkeen pesuneste kohdistetaan puhdistettavaan kaasuvirtaan. (Flagan & Seinfeld 1988, 456; Maaskola 2002.)

Kuuman savukaasun kohdatessa viileämmän pesunesteen, luovuttaa savukaasu osan lämpöenergiastaan pesurilauhdeveteen. Lämmennyt lauhde puolestaan käytetään kaukolämpöveden lämmitykseen tai palamisilman esilämmitykseen.

Rauhalahden voimalaitoksen savukaasupesuri on tyypiltään pesutorni ja sen päätekoituksia ovat rikkidioksidin sekä kiintoaineiden poisto savukaasusta (Savukaasupesuri minimoimaan Rauhalahden päästöt. 2016).

7.2 Jäähtymän vaikutus savukaasupesuriin

Savukaasupesurin pesunesteen lämpötilan määrytyessä kaukolämmön paluuv veden mukaan, on kaukolämpöverkon paluulämpötila ratkaiseva pesurista saatavan lämpötehon kannalta. Mitä viileämpää pesunestettä pesuriin voidaan ajaa, sitä enemmän savukaasujen lämpöenergiasta voidaan ottaa talteen. Jos pesurista saatavaa lämpöenergiaa hyödynnetään kaukolämpöveden esilämmitykseen, vähenee turbiinilta otettavan höyryn tarve. Tällöin höyry voi paisua turbiinissa pidemmälle kasvattaen sähköntuotantoa lämmöntuotannon pysyessä samalla tasolla.

Tuotantolaitokselta lähtevän kaukolämpöveden lämpötila määrytyy ulkolämpötilan, kysynnän sekä sähkön hinnan mukaan, joten paluuv veden lämpötilan ratkaisevaksi tekijäksi muodostuu käyttökohteissa tapahtuva jäähtymä. Rauhalahden voimalaitoksen pääkattilan lämpötehon ollessa 140 MW (Maaskola 2002) ja savukaasupesurin huipputehon ollessa 40 MW, (Savukaasupesuri minimoimaan Rauhalahden päästöt 2016) kattaa savukaasupesuri parhaimmillaan yli 22 % laitoksen lämmöntuotannosta. Savukaasupesurin merkityksen valossa jäähtymän optimointia voidaan pitää lämmöntuotannon kannalta perusteltuna.

Savukaasupesurin lämpötehon arvo lämmöntuottajalle kasvaa edelleen, mikäli savukaasuista talteen otetulla lämpöenergialla pystytään ajotilanteesta riippuen korvaamaan esimerkiksi raskasöljykäyttöistä erillistuotantoa. Jyväskylän Energian Rauhalahden voimalaitoksen savukaasupesuri on 40 MW:n huipputeholtaan esimerkiksi yhtä tehokas, kun Kuokkalan ja Varikon lämpökeskukset.

8 Kustannukset

8.1 Lämmönjakohuoneen kustannusarviot

Osana opinnäytetyötä selvitettiin, miten lämmönjakokeskuksen kytkentätapa vaikuttaa tehdasvalmiiden lämmönjakokeskusten hintaan. Kysely aiheesta lähetettiin viiden suuren lämmönjakokeskustoimittajan edustajalle. Sähköpostilla toteutetussa kyselyssä toimittajilta pyydettiin vastauksia seuraaviin kysymyksiin:

1. Onko kytkentätavalla eroa lämmönjakokeskuksen hintaan?
2. Missä suhteessa toimitatte perus- ja välisyöttökytkennällisiä keskuksia?
3. Vapaa kommentti aiheeseen

Opinnäytetyön kannalta yritysten ja niiden henkilöstön yksilöiminen ei ollut tarpeellista, joten vastaukset ovat esitetty nimettöminä. Tällä käytännöllä myös toivottiin saavutettavan avoimempia vastauksia toimittajilta etenkin vapaan kommentin osalta. Lämmönjakokeskusvalmistajista tavoitettiin neljä kappalatta viidestä ja heiltä saatiin alla esitettyjä vastauksia, jotka ovat numeroitu kysymysten mukaisesti:

Valmistaja 1.

1. Välisyöttökytkennällisen lämmönjakokeskuksen hinta on keskimäärin noin 250 € peruskytkennällistä kalliimpi.
2. Välisyöttökytkennällisten lämmönjakokeskusten kysyntä on kovassa kasvussa, etenkin eteläsuomen energiayhtiöiden osalta.
3. Välisyöttökytkentä on kokemuksen mukaan hyväksi havaittu ja yhtiön oma suositus. Toiveena olisi saada Energiateollisuus ry:ltä yksiselitteisempi kytkentätapasuositus.

Valmistaja 2.

1. Välisyöttökytkennällisissä lämmönjakokeskuksissa pystytään käyttämään valmisosia, kun taas peruskytkennälliset ovat käsityönä tehtyjä. Peruskytkennälliset ovat siis hieman kalliimpia.
2. Peruskytkennällisten lämmönjakokeskusten kysyntä on kasvanut K1/2013 julkaisun jälkeen. Toimitussuhde arviolta 45 / 55 peruskytkennän hyväksi. Saneerauskohteissa välisyöttökytkentä on ilmiselvä valinta.

Valmistaja 3.

1. 2- vetoista käyttövesisiirrintä käytettäessä hintaa muodostuu kohteen lämpötehosta riippuen 100 – 1000 € enemmän, kuin 1 – vetoisella siirtimellä.
2. Peruskohteissa välisyöttökytkentöjen osuus on noin 80 % toimitettavista paketeista.
3. 2- vetoinen käyttövesisiirrin on toiminnaltaan aina 1- vetoista parempi. se on virtausmatkaltaan pidempi ja vesitilavuudeltaan suurempi. 2- vetoinen käyttövesisiirrin on

myös liitännöiltään monipuolisempi kuin 1- vetoinen. 2 – vetoinen on käytössä aina kun mahdollista.

Valmistaja 4.

1. Hintaero kytkentätapojen välillä on käytännössä nolla. 2-teinen lämmönsiirrin tarvitsee kaksi yhdettä peruskytkennällistä siirrintä enemmän. Siirtimen kustannusero koko lämmönajokokeskuksessa jää alle yhden prosentin.
2. Uudisrakennusten kohdalla peruskytkentää käytetään noin 60 – 70 % kohteista. Saneerauskohteisissa käytetään 80 - 90 % välisyöttökytkentää.
3. Ruotisisä välisyöttökytkentää pidetään selkeästi parhaana vaihtoehtona. Kytkeäntapaa valitessa tulisi kuitenkin kiinnittää huomiota paluuvien lämpötilaan, pysyvyykäyrään sekä käyttövien kulutukseen.

Kyselystä kävi ilmi, että kytkentätavan vaikutukset hintaan eivät suinkaan ole yksiselitteisiä. Hintaerot valmistajien välillä johtunevat lämmönsiirrinvalmistustyyppin painopisteestä. Valmistajien kesken yhtenäistä oli positiivinen suhtautuminen välisyöttökytkennän käyttöön, sen sijaan eroavaisuuksia ilmeni kytkentätapojen välisen tilauskannan kehityksen suunnasta.

8.2 Vaikutus paluuviesimaksuun

Jyväskylän Energia otti vuonna 2015 käyttöön yritysasiakkaiden kaukolämmölle uuden hinnoittelumallin, jonka pyrkimyksenä on kannustaa yritysasiakkaita energiansäästötoimenpiteisiin sekä parantamaan jäähtymää taloudellisilla kannustimilla. Hinnoitusmuutos toteutettiin vähentämällä perusmaksun osuutta laskusta sekä ottaamalla käyttöön huipputeho- ja paluuviesimaksut. Paluuviesimaksun ideana on antaa asiakkaalle mahdollisuus säästää lämmityskustannuksissa kasvattamalla jäähtymää. Keskiarvoa alemmalla jäähtymällä paluuviesimaksu näkyy asiakkaalle laskutuksena. Tavoitteena oleva jäähtymän kasvu on sekä asiakkaan että lämmöntuottajan kannalta edullinen. Alla olevassa taulukossa 4 on esitetty paluuviesimaksun laskenta-kaava.

Taulukko 4. Jyväskylän Energian paluuvesimaksuperiaate (Kaukolämmön hinnasto 2015).

Paluuvesi T_p °C	Paluuvesi, hyvitys tai laskutus €/kk
–35	$(0,5 \times (T_p - 35) \times E)$
35–46	0
46–55	$(0,5 \times (T_p - 46) \times E)$
55–	$(2,1 \times (T_p - 55) \times E)$
T_p on kuukauden paluuv veden lämpötilan keskiarvo. E on kuukauden energiankulutus.	

Taulukkoa 4 mukaillen, jos esimerkiksi 50 MWh kuukaudessa kuluttava kerrostaloyhtiö onnistuu kasvattamaan kiinteistön jäähtymää kolmella asteella, laskien paluuvden lämpötilaa 35 asteesta 32 asteeseen, tarkoittaisi se kyseisen taloyhtiön osalta 75 euron hyvitystä kuukaudessa. Koko seitsemän kuukauden lämmityskaudelta tämä tarkoittaisi yhteensä 525 € säästöä. Paluuvesimaksulla on siis mahdollista saavuttaa tuntuvia taloudellisia säästöjä samalla parantaen energiatehokkuutta. Laskutus ja hyvitys on rajattu enimmillään 10 % laskun kokonaissummasta (Kaukolämmön hinnasto 2015). Taulukossa 5 on esitetty esimerkkilaskelmia paluuvesimaksun vaikutuksista loppulaskuun erilaisilla lämmönkulutuksilla.

Taulukko 5. Paluuviesmaksun vaikutus loppulaskuun

Paluuviesden lämpötila, °C	Energiankulutus, MWh				
	30	40	50	60	
30	-75	-100	-125	-150	€
32	-45	-60	-75	-90	€
34	-15	-20	-25	-30	€
36	0	0	0	0	€
46	0	0	0	0	€
48	30	40	50	60	€
54	120	160	200	240	€
56	63	84	105	126	€
58	189	252	315	378	€

Taulukosta 5 nähdään, että paluuviesden keskimääräisillä lämpötiloilla ei ole vaikutusta laskun loppusummaan. Paluuviesden lämpötilan noustessa yli 55 °C alkaa laskutus kasvamaan selkeästi. Kulutuskohteen jäähtymän ollessa 10–15 °C normaalia helpompi, täytyy kohteen järjestelmissä olla jotain pielessä. Kasvanut paluuviesmaksu voi kieliä säätöventtiilien uusimistarpeesta tai käyttöikänsä päähän tulleista lämmönsiirtimistä.

Opinnäytetyössä tutkittuihin kaukolämpökohteisiin paluuviesmaksu vaikutti seuraavasti: uusista kohteista 7,7 % alitti hyvitykseen oikeuttavan paluuviesden lämpötilarajan ja 2,6 % puolestaan sai lisälaskutusta. Vanhoista kohteista hyvitykseen oikeutettuja oli 4 % ja lisälaskutusta tuli yhdelle prosentille kohteista.

9 Tulokset

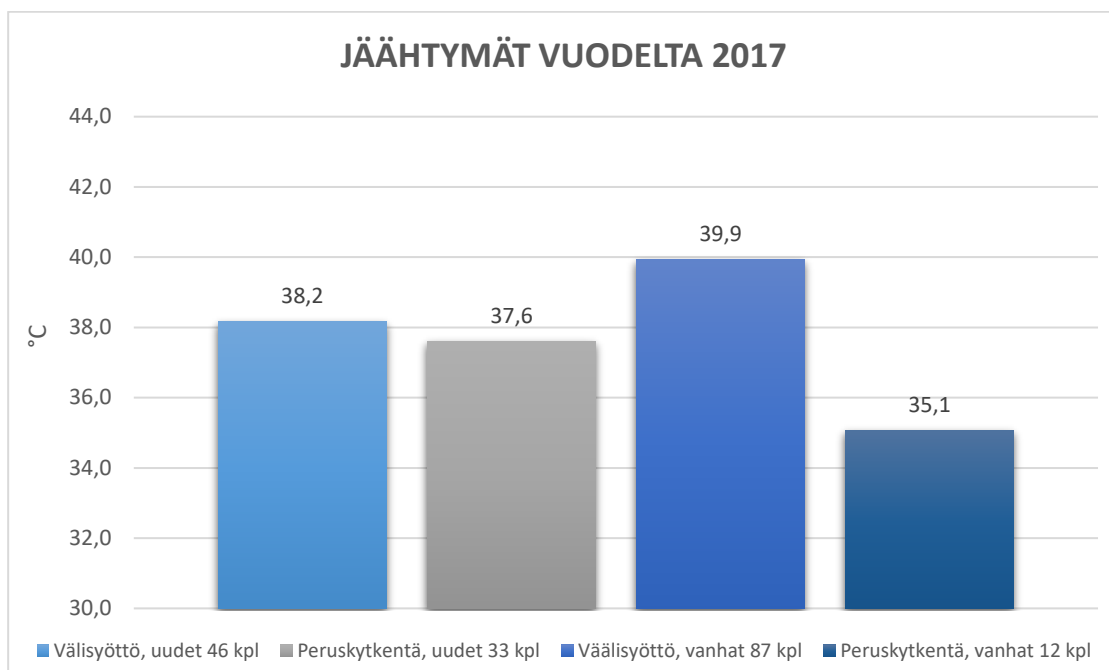
9.1 Opinnäytetyön tutkimustulokset

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää kaukolämmön asiakaslaitteiden kytkentätavan vaikutukset kaukolämpöveden jäähtymään. Tutkimusongelmaan haettiin vastausta purkamalla toimeksianto tutkimuskysymyksiin, joita olivat:

- Mikä on jäähtymän suuruus uusilla mitoituslämpötiloilla ilman välisyöttökytkentää?
- Mikä on jäähtymän suuruus uusilla mitoituslämpötiloilla välisyöttökytkennällä?
- Mikä on jäähtymän suuruus vanhoilla mitoituslämpötiloilla?
- Toteutuvatko uudet mitoituslämpötilat seuratuissa kohteissa?
- Mitä tuotannollisia etuja suuremmalla jäähtymällä saavutetaan?
- Mikä on kytkentätavan vaikutus lämmönjakokeskuksen hintaan?
- Miten asiakkaat hyötyvät jäähtymän kasvattamisesta

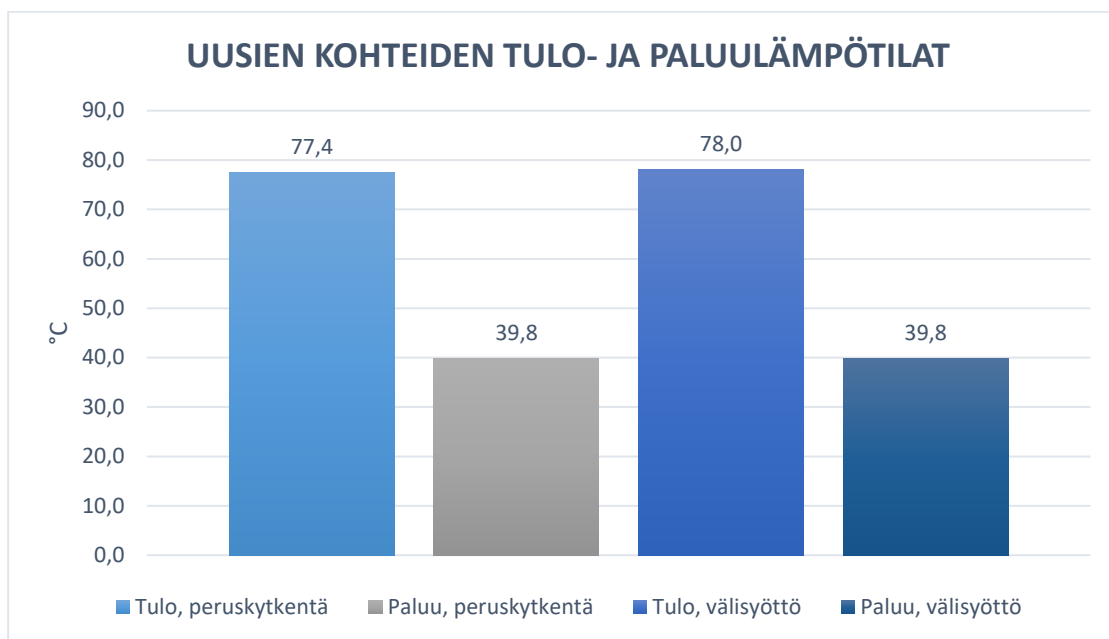
Tutkimuskysymyksiin haettiin vastauksia tarkastelemalla yhteensä vajaan kahdensadan kaukolämpökohteen kytkentäkaavioita ja etäluentamittaustietoja. Tutkimustyön pohjalta saatiin muodostettua alla esitettyjä tutkimustuloksia. Tutkimustuloksissa esiintyvät otosjoukot koostuvat vuonna 2014 ja sen jälkeen valmistuneista kohteista, joissa on käytetty vuoden 2013 mitoituslämpötiloja, sekä vanhemmista, vuosina 1995 - 2003 valmistuneista kohteista, jotka ovat mitoitettu sen aikakauden ohjeistuksen mukaisesti.

Tutkimuksen kannalta merkittävin havainto oli se, että välisyöttökytkennällä saavutetaan peruskytkentää parempi jäähtymä myös uusilla, vuonna 2013 julkaistuilla mitoituslämpötiloilla (ks. kuvio 17). Tuloksien tulkinta on kuitenkin hieman ristiriitaista, sillä vaikka välisyöttökytkentä tarjoaa suuremman jäähtymän, se ei kuitenkaan tarjoa peruskytkentää alemmaa paluuveden lämpötilaa (ks. kuvio 18). Näin ollen paremman jäähtymän syy löytyy välisyöttökytkennällisten kohteiden korkeammasta tuloveden lämpötilasta. Koska ero paluuviesien lämpötiloissa on virhemarginaaliin nähden merkityksetön, täytyy tilannetta pohtia tulovesien lämpötilaeron kautta.



Kuvio 17. Uusien kohteiden jäähtymät vuodelta 2017

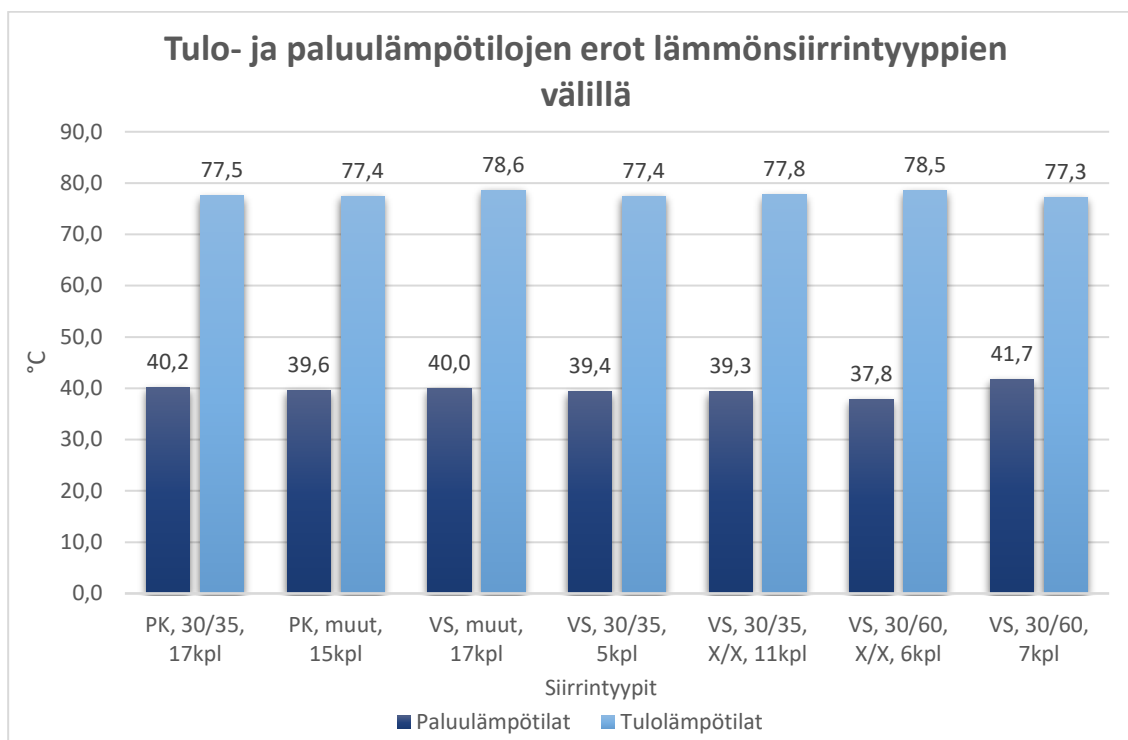
Kuviossa 17 on esitetty tutkittujen kohteiden jäähtymät jaoteltuna kytkentätavan mukaan uusiin ja vanhoihin kohteisiin. Kuvioista nähdään, että uusilla mitoituslämpötiloilla väälisyöttökytkennällä saavutetaan keskimäärin 0,6 °C parempi jäähtymä, kuin peruskytkennällä. Kuvioista nähdään myös, että vanhoilla mitoituslämpötiloilla väälisyötön vaikutus jäähtymään on merkittävä, jäähtymien eron ollessa 4,8 °C.



Kuvio 18. Uusien kohteiden tulo- ja paluulämpötilat vuodelta 2017

Kuvion 18 pohjalta nähdään, että erot jäähtymien välillä selittyvät tulolämpötilan perusteella. Välisyöttökytkennällisten kohteiden tulolämpötilat olivat keskimäärin 0,6 °C korkeammat, kuin peruskytkennällisissä kohteissa. Paluulämpötilassa puolestaan ei ole merkittävää eroa. Tulolämpötilojen erolle ei löytynyt yksiselitteistä syytä.

KytKentätavan ohella selvitettiin, miten uusien kohteiden erilaiset toisiopuolen lämmönsiirrinmitoitukset jakautuivat ja miten erilaiset mitoituset vaikuttavat jäähtymään. Kuviossa 19 on esitetty kaukolämpöveden tulo- ja paluulämpötilojen erot erilaisilla mitoituslämpötiloilla sekä kytKentätavoilla. Kuvion lämmönsiirritimet on jaoteltu lämpötiloittain. Merkinnällä "X/X" tarkoitetaan tapauksia, joissa kohteessa on yksi tai useampi eri lämpötilamitoituksella oleva lämmönsiirrin kuvioon jaotellun siirtimen lisäksi (ks. liite 3). Merkinnällä "PK" viitataan peruskytkentään ja "VS" välisyöttökytkentään.



Kuvio 19. Tulo- ja paluulämpötilojen erot lämmönsiirrintyyppien välillä

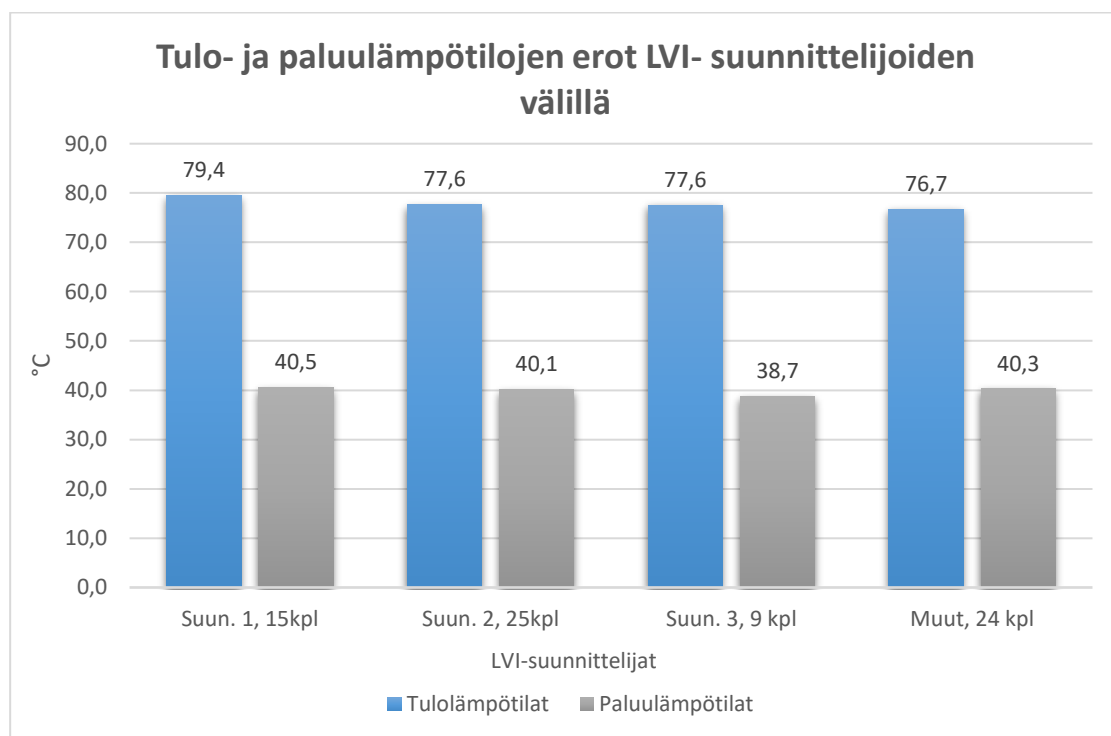
Kuviosta 19 nähdään, että keskimääräisesti jäähtymä paranee, mikäli kohteessa on yksi tai useampi siirrin varsinaisen lämmityssiirtimen lisäksi. Useamman lämmönsiirtimet kohteet sisältävät ilmanvaihdon lämmityksen, lattialämmityksen tai molemmat näistä. Välisyöttökytkentäkohteiden kohdalla huomioimisen arvoista on 30/60 ja 30/35 mitoituksilla olevien kohteiden väliset erot. Kuvion perusteella pelkällä lattia- lämmityksellä (30/35) saavutetaan pelkkää radiaattorilämmitystä (30/60) selkeästi parempi jäähtymä, kun taas monivaihdinkohteissa lämpötilojen erot kääntyvät päinvastoin.

Uutta radiaattorilämmityssuositusta (30/45) käyttäviä kohteita oli yhteensä neljä kappaletta. Määrällisesti pienen joukon ohella niitä ei ollut mielekäästi edustaa tässä yhteydessä omana joukkonaan, sillä kolme neljästä kohteesta sijaitsi samalla asuin- alueella, joka ei ole sijaintinsa ja kaukolämpöverkon toiminnan kannalta edustava.

Lämpötila- ja kytkentätietojen lisäksi tutkituista kohteista kerättiin tietoa lämmönsiirrinvalmistajista, LVI-suunnittelijoista sekä LVI-urakoitsijoista. Yritysten välisen vertailutiedon kerääminen rajoittui uusien kohteiden otokseen kahdesta syystä: vanhoista

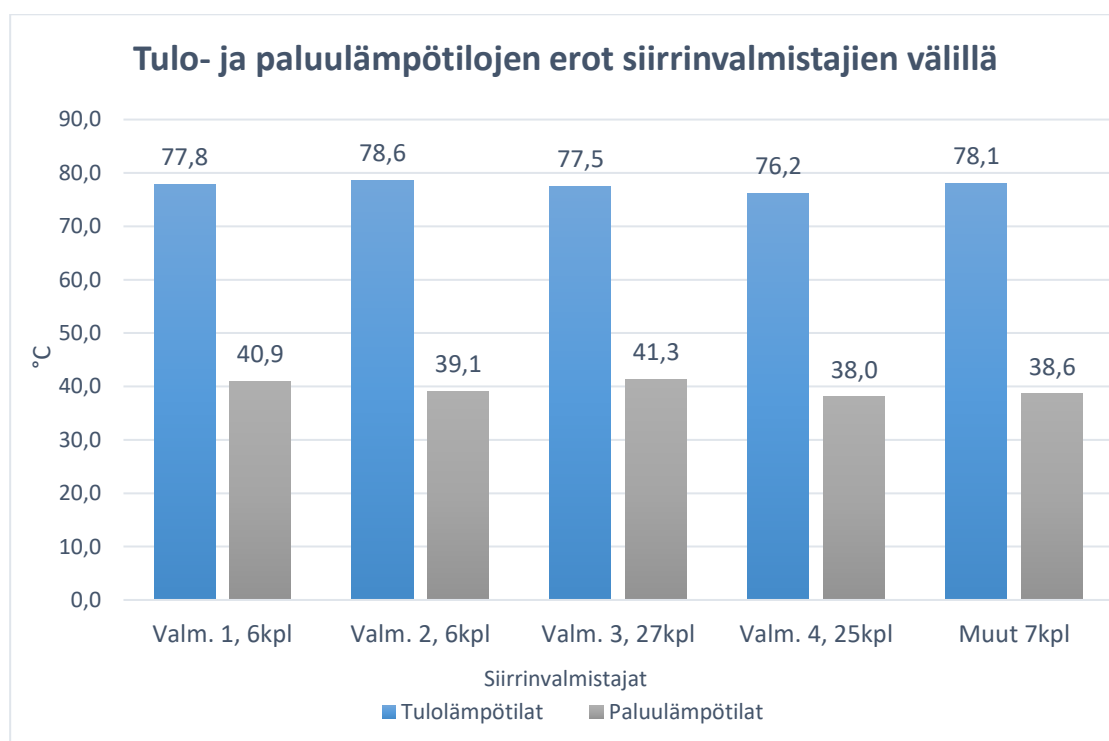
kohteista tietoja löytyi niin vähän, että edustavuus olisi ollut heikko. Lisäksi, vanhojen kohteiden osalta vertailuun olisi tullut valmistajia ja yrityksiä, joita ei enää ole olemassa.

Kerättyjen tietojen perusteella voitiin tarkastella löytyykö jäähtymistä merkittäviä eroja valmistajien, suunnittelijoiden tai urakoitsijoiden välillä. Koska yritysten väliset erot eivät olleet tämän opinnäytetyön päätutkimuskohde, tulokset on esitetty ilman yritysten nimiä. Kuvioissa 20, 21 ja 22 on esitetty keskimääräiset tulo- ja paluulämpötilojen erot eri toimijoiden välillä. Mikäli yrityksellä tai valmistajalla oli huomattavan vähän kohteita tutkittavana, eikä niitä näin ollen ollut mielekästä edustaa omana joukkonaan, on ne yhdistetty kuvioissa joukkoon ”muut”.



Kuvio 20. Tulo- ja paluulämpötilojen erot LVI-suunnittelijoiden välillä

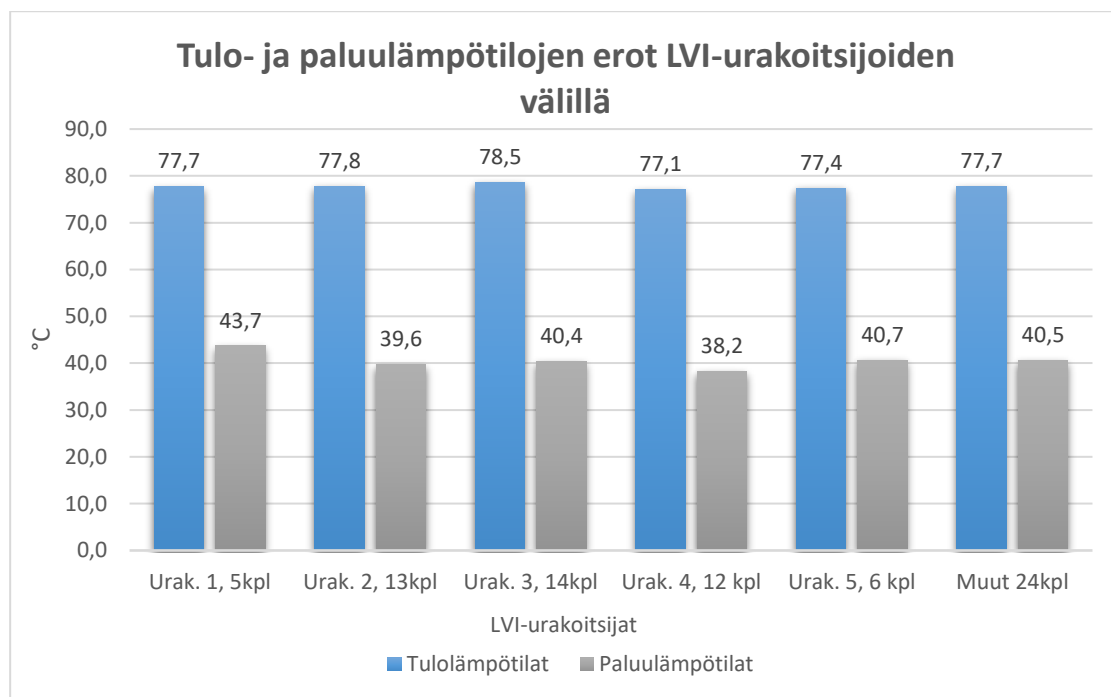
Kuviosta 20 nähdään, että selvästi keskiarvoa heikoimman jäähtymän kohteita ovat joukon ”muut” muodostavat pienten suunnittelutoimistojen kohteet. Kolmesta suu-
resta suunnittelutoimistosta 1 ja 2 ovat paluuveden lämpötilaltaan hyvin lähellä toisi-
aan. Suunnittelutoimisto 3 tarjoaa selvästi joukon alhaisimman paluuveden lämpöti-
lan. Vertailu ei tuottanut valtavia eroja eikä yllätyksiä eri suunnittelijoiden välillä.
Huomioimisen arvoista on se, että yksikään suunnittelutoimisto ei keskimäärin alita
paluuvesimaksuun oikeuttavaa paluuveden lämpötilarajaa.



Kuvio 21. Tulo- ja paluulämpötilojen erot siirrinvalmistajien välillä

Kuviossa 21 on esitetty vertailu eri lämmönsiirrinvalmistajien kesken. Merkittäviä suorituskykyeroja siirrinvalmistajien välillä ei ole, mikä kertoo tasalaatuisuudesta. Mainitsemisen arvoinen huomio on myös valmistajan 4 toimittama keskiarvoa alhaisempi paluuveden lämpötila joukon pienimmällä tuloveden lämpötilalla. LVI-

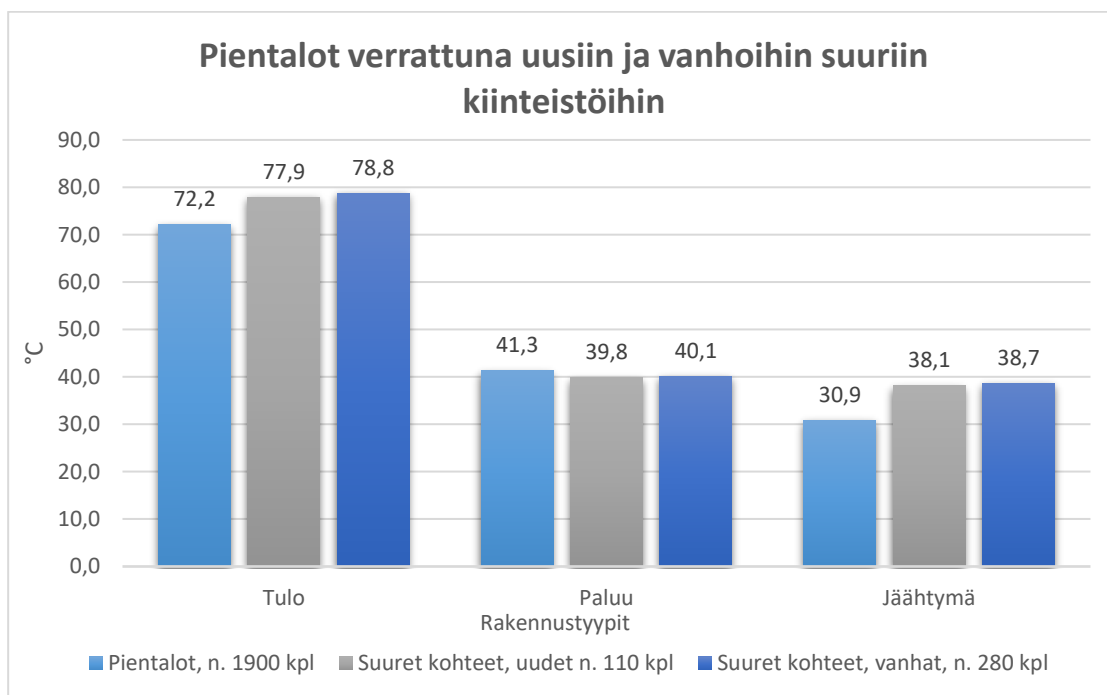
suunnittelijoiden tavoin, yksikään lämmönsiirrinvalmistaja ei keskimäärin alita paluuv-
vesimaksuun oikeuttavaa alle 35 °C paluuveden lämpötilaa.



Kuvio 22. Tulo- ja paluulämpötilojen erot LVI-urakoitsijoiden välillä

Kuviossa 22 on vertailtu tulo- sekä paluuveden lämpötilojen eroavaisuuksia LVI- urakoitsijoiden mukaan. Urakoitsija on merkittävässä roolissa lopputuloksen kannalta, koska urakoitsija on vastuussa lämpökeskuksen virittämisestä oikeisiin toimintalämpötiloihin ja säätöventtiilien toimintaan. Kuviosta nähdään, että urakoitsijoiden välillä on löydettävissä merkittäviä eroja. Heikoimman ja parhaimman jäähtymän välillä on eroa yli 4 astetta, joka on kohtuullisen paljon.

Vaikka pientalot eivät kuuluneetkaan tämän opinnäytetyön piiriin, on niistä koottu vertailumielessä lämpötilatietoa. Kuviossa 23 kaikkia pääverkon pientaloja on vertailtu kaikkiin pääverkossa oleviin, tutkinnassa olleiden perusjoukkojen kriteerit täyttäviin suurkohteisiin. Kuvion 23 suurempia joukkoja ei ole tutkittu kytkentäkaavioiden osalta, eikä käytetty muissa tämän työn tuloksissa.



Kuvio 23. Lämpötilojen vertailu rakennustyypeittäin

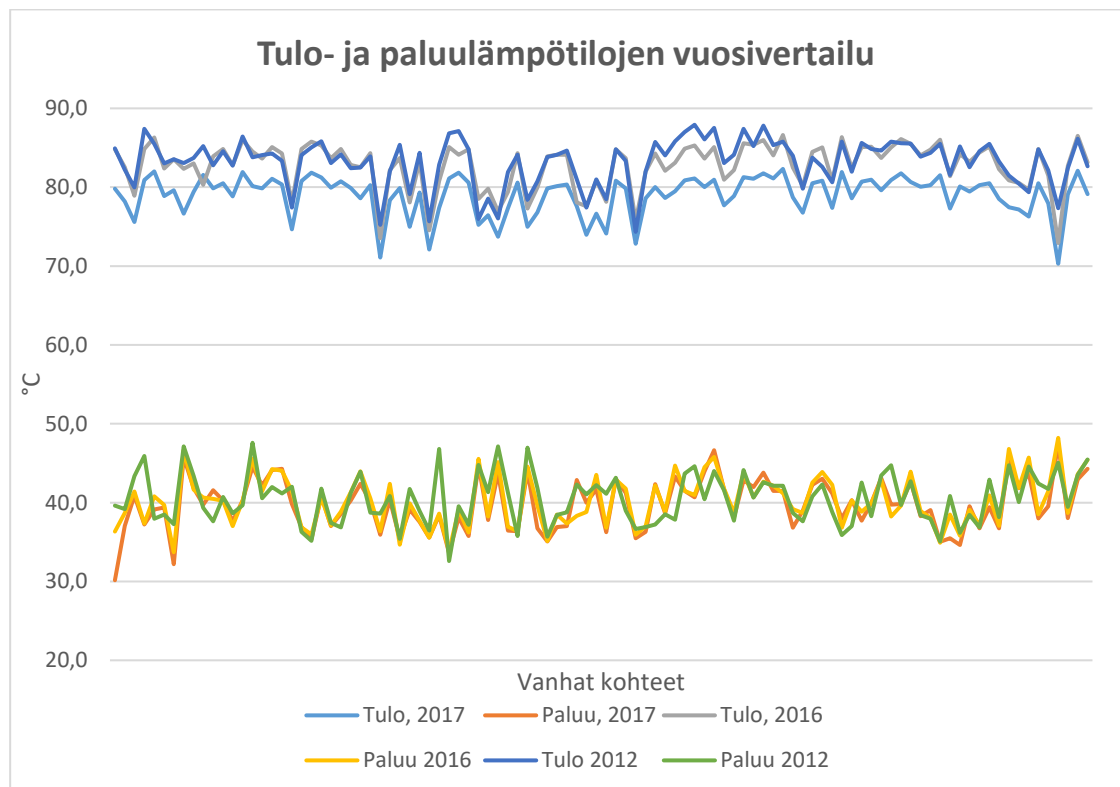
Kuvio 23 antaa hyvän peruskäsityksen siitä, miten pientalot sijoittuvat lämpötilatasoiltaan ja jäähtymältään verrattuna suuriin käyttökohteisiin. Pientalojen huomattavasti alempi tuloveden lämpötila johtuu valtaosin pienkohteiden sijainnista verkossa: pientalot sijaitsevat poikkeuksia lukuun ottamatta kauempana keskustasta, verkon reuna-alueilla pienten siirtojohtojen varrella. Suuret kohteet puolestaan ovat usein lähempänä keskustaa ja suurten runkolinjojen läheisyydessä.

Pientalojen heikkoa jäähtymää osin selittää lämmönsiirtimien mitoitus: pientaloihin asennetaan kohteiden tehosta riippumatta vakiokokoinen siirrin, joka on usein todellista tehontarvetta silmällä pitäen ylimitoitettu. Lisäksi pientalojen lämmönjakokeskusten viritystä ei ole juurikaan ohjattu, vaan se nojaa kiinteistön omistajan omaan kiinnostukseen. Toisin sanoen, pientalokohteita ei suunnitella ja optimoida läheskään yhtä tarkoin, kuin yritysasiakkaiden kohteita.

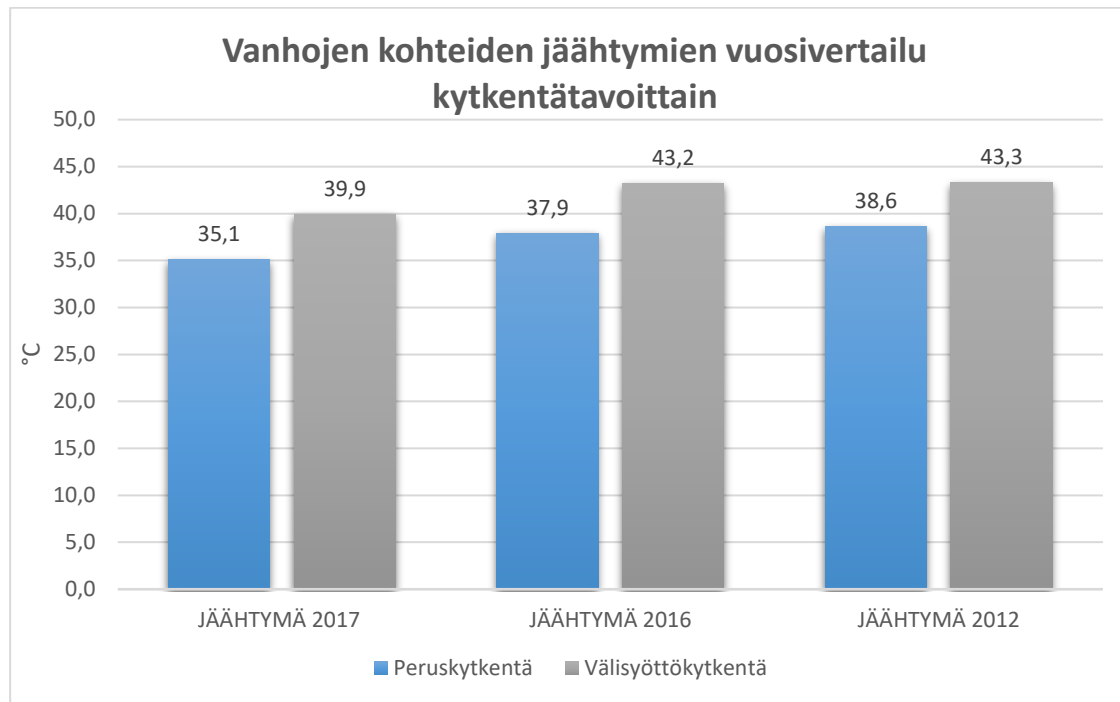
Toimeksiantaja halusi vanhoista kohteista vertailutietoa eri vuosien väliltä. Vuoden 2017 lämpötilojen vertailuvuodeksi valikoituivat vuodet 2016 ja 2012. Vuosi 2016 oli toimeksiantajalle kiinnostava, sillä sinä vuonna kaukolämpöverkkoa ajettiin poikkeavalla ajomallilla. Kolmanneksi vertailuvuodeksi haluttiin ajallisesti mahdollisimman

kaukana oleva vuosi, jolloin olisi kaikissa kohteissa siirrytty uuteen etämittaustekniikkaan. Tätä kautta päädyttiin vuoteen 2012.

Kuvioissa 24 ja 25 on esitetty tulo- ja paluulämpötilatietoja sekä eri kytkentätavoilla saavutettuja jäähtymiä vertailuvuosilta. Kuviossa 24 X-akselia edustavat kaukolämmön käyttökohteet.

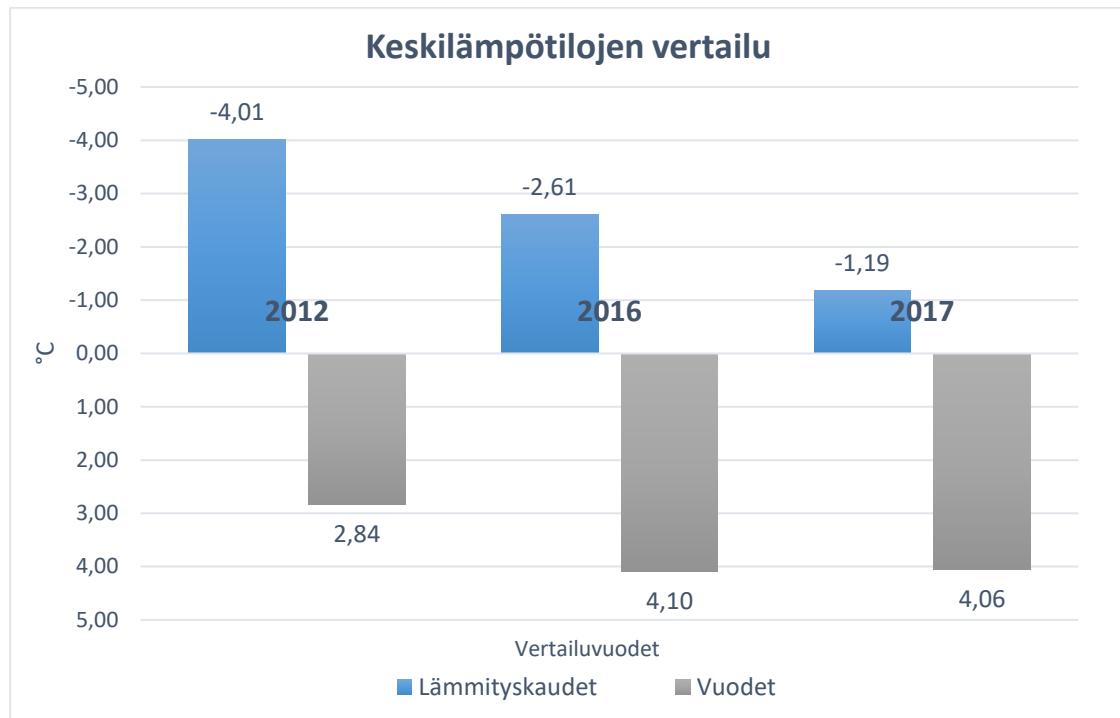


Kuvio 24. Vanhojen kohteiden tulo- ja paluulämpötilat vuosittain



Kuvio 25. Vanhojen kohteiden jäähtymien vuosivertailu kytkentätavoittain

Kuvion 24 perusteella paluulämpötilat ovat kolmelta vertailuvuodelta hyvin tasaiset, kun taas tulolämpötiloissa on huomattavia eroja. Vuosi 2017 on tulolämpötilatasoltaan selvästi kahta vertailuvuotta alemmalla tasolla. Nämä erot tulevat esille kuvion 25. jäähtymätiedoissa, joissa vuosi 2017 on jäähtymän kannalta selvästi vuosia 2016 ja 2012 heikompi. Syitä näihin eroihin on haettu vuosien välisistä lämpötilaeroista, jotka on esitetty kuviossa 26.



Kuvio 26. Ulkolämpötilojen vertailu

Kuvio 26 on osaltaan mielenkiintoinen, sillä pelkästään vuosien keskilämpötiloja tarkastellessa ei löydy vuoden 2017 alemmaa menolämpötilaa selittävää tekijää. Kun tarkastellaan puolestaan lämmityskausien keskilämpötiloja, alkaa syy hahmottua. Vuoden 2017 lämmityskauden keskilämpötila on ollut 1,42 astetta edellisvuotta suurempi ja yli 2,8 astetta vuoden 2012 vastaavaa lämpötilaa suurempi. Lämmityskauden korkea lämpötila alentaa tuotantolaitoksilta lähtevän kaukolämpöveden lämpötilatasoa.

9.2 Tulosten luotettavuuden arviointi

Opinnäytetyön tuloksien luotettavuutta arvioidessa on syytä viitata tutkimustyyppille ominaisiin seikkoihin. Heikkilä jakaa määrällisen tutkimuksen tuloksien arvioinnin validiteettiin sekä reliabiliteettiin. Validi tutkimus ei sisällä virheitä, antaa keskimääräisesti oikeita tuloksia ja ennen kaikkea mittaa sitä, mitä oli tarkoitus. Reliaabeli tutkimus puolestaan on tuloksiltaan tarkka ja tarvittaessa toistettavissa samoin tuloksin. (Heikkilä 2014.)

Otostutkimukselle luotettavuuden kannalta ensiarvoisen tärkeää on kattava, oikein valittu ja perusjoukkoa hyvin kuvaava otos. Opinnäytetyön uusia kohteita kuvaava otos kattoi 78 kohdetta noin 110:stä oikealla aikavälillä valmistuneista ja oikean kokoluokan kohteen perusjoukosta. Otos oli laajuudeltaan prosentuaalisesti noin 71 % perusjoukosta, mitä voidaan pitää hyvin kattavana. Otoksen ulkopuolelle jäi kohteita erilaisista syistä, näitä olivat muun muassa puuttuva tai puutteellinen dokumentaatio, tutkinnan kannalta vääränlainan kytkentätapa tai lähellä vuoden 2016 loppua valmistuneiden kohteiden selkeästi tavallista alhaisempi käyttöaste (ks. liite 4).

Vanhojen kohteiden otos käsitti 100 kappaletta noin 280 oikealla aikavälillä valmistuneen ja oikean kokoluokan kohteen perusjoukosta. 36 %:n kattavuutta voi myös pitää otantatutkimukselle hyvänä arvona. Kaiken kaikkiaan tutkitut kohteet kattoivat noin 10 % kaikista Jyväskylän kaukolämpöverkon kohteista pois lukien pientalot. Otoksien osalta tutkimuksen luotettavuutta voidaan pitää tutkimuksen luonnetta silmällä pitäen hyvällä tasolla.

Otoksen kattavuuden lisäksi tutkimustulosten luotettavuuteen liittyen nousi muutamia huomioita. Tutkimuksen luotettavuutta puoltaa otoksen laaja ja tasainen topologinen jakautuminen (ks. liitteet 5 ja 6), joka osaltaan vahvistaa luotettavaa kuvaa verkon todellisesta kokonaistoiminnasta. Tämän lisäksi luotettavuutta tukee kokonaisten vuoden kattava mittausjakso, joka pituudellaan lisää tutkinnan edustavuutta.

Opinnäytetyön tuloksien perustuessa mittausdataan on tuloksien luotettavuutta arvioidessa syytä pitää mielessä mittauksen epätarkkuudet. Laskutuksen perusteena oleva nykyaikainen lämpötilamittaus on lähtökohtaisesti hyvin tarkkaa, mutta tietty mittausepävarmuus on aina olemassa. Mittausepävarmuuden vaikutusta lopputulokseen on pyritty minimoimaan tarkastelemalla mahdollisimman suurta joukkoa, jolloin yksittäisten epätarkkojen lämpötilamittareiden vaikutus kokonaistulokseen on marginaalinen.

Tulosten luotettavuutta heikentävät osaltaan myös mittaustekniset ongelmat. Monissa otoksen kohteissa tulopuolen lämpötilamittaus oli ollut ajoittain pois päältä vikatilanteiden, sähkökatkojen tai korjaustöiden takia. Ajanjaksot vaihtelivat muutamista tunneista muutamaan päivään. Tämä muodostui epäedulliseksi tutkimuksessa

käytetyn datan kannalta, sillä tuntidataa keräävä ohjelmisto laski pois päältä olevan mittauksen lämpötilatiedon nollaksi. (ks. liite 7.)

Lisäksi tulopuolen mittauksen ollessa häiriötilanteessa paluupuolen lämpötilatiedoksi lasketaan automattisesti 40 astetta, johtuen paluuvesimaksun sisältävästä laskutusmallista. Tämä osaltaan vääristi myös paluuveden tuntidataa kohteissa, joiden mittauksessa oli vuoden 2017 aikana ollut ongelmia. Koska mittausjaksona kuitenkin käytettiin kokonaista vuotta, ei kymmenienkään tuntien mittausvirheet vaikuta tutkimuksen lopputulosten validiuteen ratkaisevasti.

Valmistajien ja yritysten sekä lämmönsiirrinten mitoituslämpötilojen välisessä vertailussa tuloksiin (kuviot 18 – 21) on syytä suhtautua suuremmalla varauksella. Vertailun perusjoukkona oli 78 kohdetta, joka on perusjoukkona pienehkö. Pienestä perusjoukosta muodostettujen otosten ongelmaksi muodostuvat yksittäisten poikkeavien kohteiden otosta vääristävä vaikutus. Tästä syystä yritysten välisistä eroista ei ole mielekästä vetää pitkälle meneviä johtopäätöksiä tutustumatta otoksien kohteisiin tarkemmin.

10 Johtopäätökset

Opinnäytetyön päätavoitteena oli selvittää, miten välisyöttökytkentä vaikuttaa kaukolämpöveden jäähtymään vuoden 2013 mitoituslämpötila-arvoilla. Lisäksi tavoitteena oli jäähtymien vertailu uusien ja vanhojen mitoituslämpötilojen välillä. Kolmantena tavoitteena oli selvittää, miten kytkentätapa vaikuttaa lämmönjakohuoneen hintaan sekä asiakkaiden energiamaksuihin.

10.1 Välisyöttökytkennän kannattavuus

Tuloksista käy ilmi, että välisyöttökytkentä on peruskytkentää hieman tehokkaampi jäähdyttävä. Jyväskylän Energian tuotannon kannalta jäähtymää ja tulolämpötilaa tärkeämpää on kuitenkin tuotantolaitoksille palaavan kaukolämpöveden lämpötila.

Koska tutkittavien välisyöttökytkentäkohteiden tulolämpötila oli keskimäärin peruskytkentäkohteita korkeampi, ei välisyöttökytkennällä päästy paremmalla jäähtymäläkään peruskytkentäkohteita alempaan paluuveden lämpötilaan.

Suurta ja maantieteellisesti kattavaa otosta tarkastellessa eroa tulolämpötiloissa ei kuitenkaan pitäisi ilmetä. Syitä ilmenneelle erolle etsittiin kohteiden maantieteellisestä sijainnista tuotantolaitoksiin nähden, mutta ilmennyt eroa selittävää jakautumaa ei löytynyt kummankaan kytkentätavan eduksi. Todennäköisin syy tulolämpötilojen erolle löytyy tutkittujen kohteiden erilaisista käyttöprofiileista. On mahdollista, että välisyöttökohteissa on yliedustettuna suhteessa peruskytkentäkohteisiin paljon lämmintä käyttövettä kuluttavia kohteita, jotka kasvattavat kohteille tulevan kaukolämpöveden virtausta, joka puolestaan nostaa keskimääräistä tuloveden lämpötilaa.

Oletettaessa, että koko verkon osalta kytkentätavalla ei ole merkitystä kiinteistölle saapuvan kaukolämpöveden lämpötilaan, voidaan välisyöttökytkentää pitää Jyväskylän Energian tuotantolaitosten sekä kaukolämpöverkon kannalta tarkasteltuna kuitenkin suositeltavana vaihtoehtona. Tutkimustulokset osoittivat, että välisyöttö- ja peruskytkennän välinen jäähtymäero uusilla mitoituslämpötiloilla oli keskimäärin 0,6 °C, vanhoilla mitoituksilla ero oli puolestaan 4,8 °C.

Raportin teoriaosuudessa on esitetty erilaisia esimerkkilaskelmia jäähtymän kasvulla saavutettavista hyödyistä. Suurin osa esimerkkilaskelmista on perustettu yhden asteen muutokselle, mutta opinnäytetyön pohjalta on mahdoton sanoa, kuinka paljon koko kaukolämpöverkon jäähtymä paranisi, mikäli kaikissa soveltuvissa uudisrakennus- ja saneerauskohteissa käytettäisiin tämän raportin julkistamisen jälkeen välisyöttökytkentää. Näin ollen säästöihin ja tuotannonlisäyksiin liittyviä tarkkoja arvioita on hankala esittää.

Tutkimistuloksista käy ilmi, että välisyöttökytkentää suosimalla saavutetaan parempi jäähtymä, jolloin saavutetaan säästöjä pumppauskustannuksissa, lämpöhäviöissä, lämmöntuotannossa sekä sähköntuotannossa. Jyväskylän Energialla on mahdollisuuksia hyödyntää jäähtymän kasvulla ja lämmöntuotannon kustannuksella saavutettava sähköntuotannon lisäys, sillä nykytilanteessa tuotantokapasiteetti on mittava. Peruskuormalla yksin käytössä oleva Keljonlahden voimalaitos on lämpöteholtaan reilusti yli puolet kaupungin huipputehontarpeesta ja yhteiskäytössä Rauhalahden kanssa kahden laitoksen lämmöntuotanto on kovimpia pakkasviikkoja lukuun ottamatta lämpötehontarvetta selvästi suurempi. Näin ollen sähköntuotantoa olisi mahdollisuus kasvattaa ilman pelkoa lämmön erillistuotannon tarpeen lisääntymisestä.

Kaukolämpöasiakkaiden osalta kytkentätapa voi vaikuttaa kahdella tavalla. Välisyöttökytkennällä keskimäärin saavutettava suurempi jäähtymä voi joillakin asiakkailla näyttäytyä paluuvessimaksun kautta lämmityslaskun pienentymisenä. Kytkentätapa voi vaikuttaa myös lämmönjakokeskuksen hankintahintaan: puolet kyselyyn vastanneista lämmönjakokeskustoimittajista arvioi välisyöttökytkennällisten lämmönjakokeskusten hinnan hieman peruskytkennällistä kalliimmaksi.

10.2 Toimenpide-ehdotukset

Opinnäytetyön tutkimustulosten ja niistä tehtyjen johtopäätösten sekä lämmönjakokeskusvalmistajilta saatujen vastausten perusteella välisyöttökytkennän käyttöä voi suositella kaikissa kohteissa, jotka täyttävät K1/2013 sisältämät suositusehdot. Koska lämmönjakokeskusten hintaerot kytkentätapojen välillä ovat keskimäärin hyvin pieniä, on välisyöttökytkentä myös lämpöasiakkaan kannalta suositeltava vaihtoehto käyttöikä, paluuvessimaksu ja käytännön suorituskykyä silmällä pitäen.

Opinnäytetyön perusteella tehtäviä toimenpiteitä suunnitellessa on kuitenkin syytä pitää mielessä tutkimustulosten pienet erot, virhemarginaalit ja luvussa 9.2. esitetyt tutkimuksen luotettavuuteen vaikuttavat tekijät.

10.3 Jatkotutkimusehdotukset

Opinnäytetyön kannalta kiinnostavin jatkotoimenpide olisi selvittää, minkä verran kulutuskohteiden jäähtymän kasvu vaikuttaisi tuotantolaitoksille palaavan kaukolämpöveden lämpötilaan. Tätä kautta voitaisiin myös esittää tarkempia arvioita jäähtymän kasvulla saavutettavien säästöjen ja tuotannonlisäysten määrästä.

Tämän tutkimuksen tulosten rajoittavaksi tekijäksi muodostui perusjoukon koko. Koska mitoitusohjeet on otettu käyttöön vasta vuonna 2014, ei Jyväskylään ole ehtinyt valmistua kovin suurta määrää sopivan kokoisia kiinteistöjä. Tulosten luotettavuuden varmentamiseksi voisi samanlaisen tutkimuksen halutessaan suorittaa esimerkiksi viiden vuoden kuluttua suuremmalla otoksella. Erityisen kiinnostavaa olisi tutkia, mistä tutkittujen kohteiden välisten tulovesien lämpötilojen erot johtuivat.

Mikäli toimeksiantaja kiinnostuu valmistajien, suunnittelijoiden tai urakoitsijoiden välisistä suorituskkyeroista, olisi niitä myös syytä tutkia tarkemmin. Tähän tarkoitukseen voisi sopia esimerkiksi laajempi vertailu, jossa vertailtavien yritysten kesken pyrittäisiin löytymään kooltaan ja käyttötarkoitukseltaan mahdollisimman tarkasti toisiaan vastaavia kohteita, jolloin kohteiden muut erot lämmönjakokeskuksen toimintaa lukuun ottamatta olisivat mahdollisimman pieniä.

Lähteet

- Anttonen, K. 2011. Kaukolämpöveden hyödyntäminen lämmityksessä. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, teknillinen tiedekunta, energiatekniikan koulutusohjelma. Viitattu 4.4.2018.
<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/73946/Diplomityö%2c%20Kari%20Anttonen%202011.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Energiavuosi 2017- Kaukolämpö. 2018. Materiaalipankki Energiateollisuus ry:n sivusolla. Viitattu 6.2.2018.
https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/energiavuosi_2017_-_kaukolampo.html.
- Flagan, R. & Seinfeld, J. 1988. Fundamentals of air pollution engineering. New Jersey: Prentice Hall.
- Gerhard, S-H. 2015. Renewable Heating and Cooling. Cambridge: Elsevier Science & Technology.
- Hakonen, J. 2017. Tietoa lämpökeskuksista opinnäytetyötä varten. Sähköpostiviesti. 7.3.2018. Vastaanottaja I. Lahtela. Jyväskylän Energian energiantuotannon käyttömestarin kokoama selvitys käytössä olevista lämpökeskuksista.
- Heikkilä, T. 2014. Kvantitatiivinen tutkimus. Helsinki: Edita Publishing Oy. Viitattu 22.1.2018.
<http://www.tilastollinentutkimus.fi/1.TUTKIMUSTUKI/KvantitatiivinenTutkimus.pdf>
- Helenin ohje hybridikytkennästä asiakkaan kaukolämpölaitteiston rinnalle. 2015. Helenin julkaisema ohjeistus urakoitsijoille. Viitattu 19.2.2018.
https://www.helen.fi/globalassets/lampo/ammattilaiset/kaukolampo/kaukolammon_hybridikytkenta_kaukolampolaitteiston_rinnallepdf.
- Henkilöstöinfo 12.3.2018. Henkilöstöinfon esitysmateriaali Jyväskylän Energian sisäisessä tietokannassa. Viitattu 19.3.2018.
- Hongfei, Z. 2017. Solar Energy Desalination Technology. Peking: Beijing Institute of Technology.
- How does a heat plate exchanger work. N.d. Tietoa levylämmönsiirtimien toiminnasta Quora-tiedonjakosivustolla. Viitattu 5.3.2018.
<https://www.quora.com/How-does-a-plate-heat-exchanger-work>
- Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T & Urpalainen, S. 2013. Voimalaitostekniikka. Helsinki: Opetushallitus.
- JE-yhtiöt. N.d. Tietoa JE-yhtiöstä Jyväskylän Energian sivustolla. Viitattu 22.1.2018.
<http://www.jyvaskylanenergia.fi/je-yhtiot>.
- Järvenreuna J., Nummila M. N.d. Nykyaikainen savukaasupesuri – merkittävä biolämpölaitosten kannattavuuden parantaja. Caligo Industriä nettisivusto. Viitattu 29.1.2018. http://www.caligoindustria.com/lehdisto/Caligo_Savukaasupesuri.pdf.
- Järvinen. J. 2017. Savukaasupesurin käytön optimointi. Opinnäytetyö, AMK. Jyväskylän Ammattikorkeakoulu, tekniikan ja liikenteen ala, energiatekniikan

koulutusohjelma. Viitattu 6.3.2018.

http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/131213/Jarvinen_Juuso.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Kattilan lämmönsiirtimien rakenne ja toiminta. N.d. Tietoa lämmönvaihtimista knowenergyn sivustolla. Viitattu 20.2.2018.

http://www.knowenergy.net/suomi/monipoltt_kattilat/7_lammonsiirtimet/frame.htm.

Kaukolämpöjärjestelmän paluuveden hyväksikäyttö kiinteistöjen lämmityksessä. 2010. Pöyryn laatima selvitys Energiateollisuus Ry:lle. Viitattu 8.2.2018.

<http://docplayer.fi/1158112-Energiateollisuus-ry.html>.

Kaukolämpölaitteiden seuranta- ja käyttöohjeita. N.d. Tietoa kaukolämpölaitteista ja niiden toiminnasta Jyväskylän Energian sivustolla. Viitattu 4.2.2018.

<http://www.jyvaskylanenergia.fi/filebank/210-kaukolampolaitteidenopas.pdf>.

Kaukolämmön hinnasto 2015. Yritysassiakkaiden hinnasto Jyväskylän energian - sivustolla. Viitattu 27.2.2018. http://www.jyvaskylanenergia.fi/filebank/1969-JE_Kaukolampo_hinnasto_yritysassiakkaat_alviton.pdf.

Kaukolämmön toimitusvarmuus hipoi viime vuonna sataa prosenttia. 2017.

Materiaalipankki energiateollisuus Ry:n sivustolla. Viitattu 7.2.2018.

https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukolammon_toimitusvarmuus_hipoi_viime_vuonna_sataa_prosenttia.html.

Kaukolämpöverkon suunnitelmallinen perusparantaminen. 2016. Suositus energiateollisuus Ry:n sivustolla. Viitattu 12.2.2018.

https://energia.fi/files/1340/SuositusL7_2016_Kaukolampoverkon_suunnitelmallinen_perusparantaminen.pdf.

Kaukolämpö on yhä useamman valinta. 2017. Materiaalipankki energiateollisuus Ry:n sivustolla. Viitattu 6.2.2018.

https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukolampo_on_yha_useamman_suomalaisen_valinta.html.

Kaukolämpö tuotetaan lähellä asiakasta. N.d. Tietoa kaukolämmöntuotannosta Energiateollisuus Ry:n sivustolla. Viitattu 12.2.2018.

https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/kaukolammon_tuotanto.

Koskelainen, L., Saarela, R. & Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön Käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus.

Maaskola, T. 2002. Puun ja turpeen sekapolton vaikutus leijukerroskattilan hiukkaspäästöihin. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, energiatekniikan osasto. Viitattu 4.4.2018.

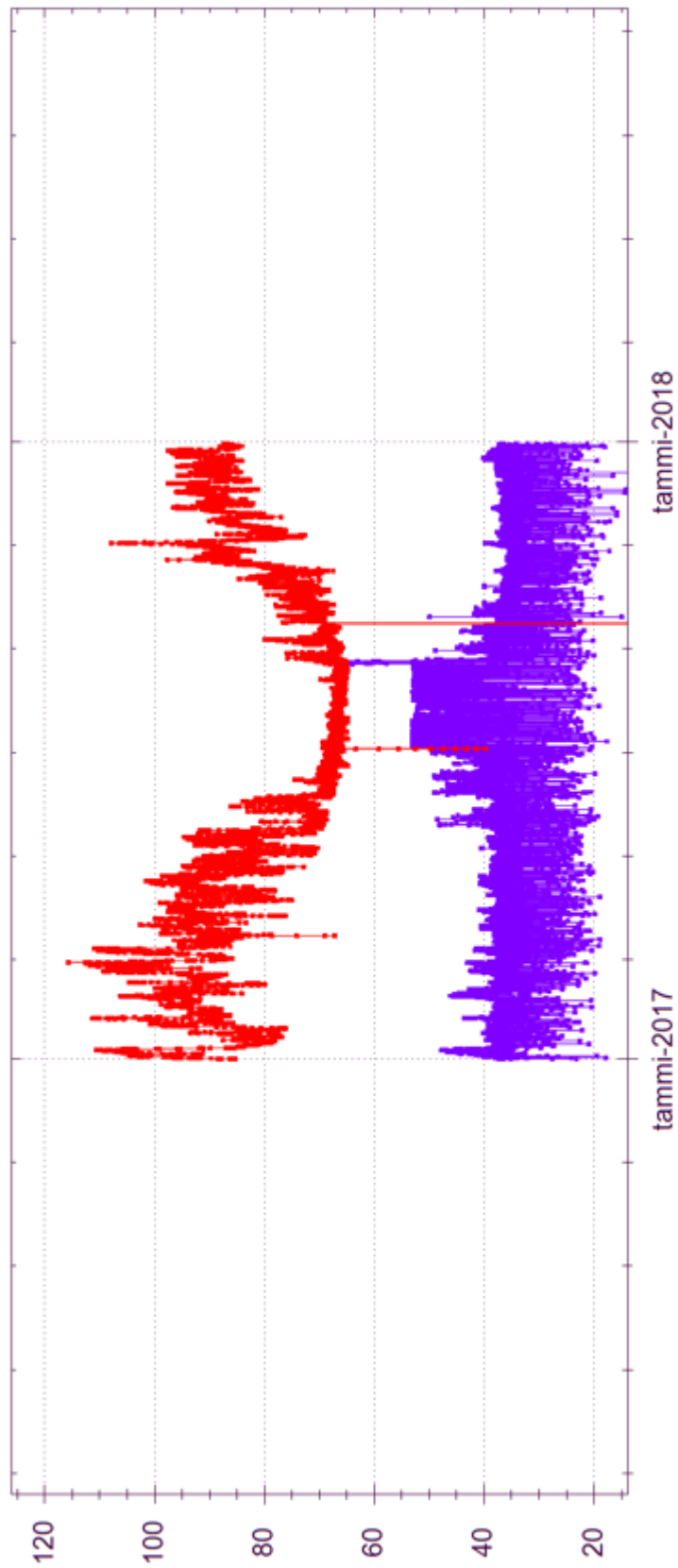
<https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/35019/nbnfi-fe20021410.pdf?sequence=1>.

Mäkelä, V-M., Tuunanen, J. 2015. Suomalainen kaukolämmitys. Mikkeli: Mikkelin ammattikorkeakoulu.

- Rakennusten kaukolämmitys 2003. Määräykset ja ohjeet, julkaisu K1/2003. Lämmönkäyttötoimikunta. Energiateollisuus Ry. Viitattu 13.2.2018. <https://www.fortum.com/countries/fi/SiteCollectionDocuments/Kaukolampo/Kaukol%C3%A4mmitys%20m%C3%A4%C3%A4r%C3%A4ykset%20ja%20ohjeet.pdf>.
- Rakennusten kaukolämmitys. 2013. Määräykset ja ohjeet, julkaisu K1/2013. Lämmönkäyttötoimikunta. Energiateollisuus Ry. Viitattu 4.2.2018. https://energia.fi/files/502/JulkaisuK1_2013_20140509.pdf.
- Rämä, M., Niemi, R. & Similä, L. 2015. Poistoilmalämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä. VTT:n laatima asiakasraportti. Viitattu 26.2.2018. <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2015/VTT-CR-00564-15.pdf>.
- Savukaasupesuri minimoimaan Rauhalahden päästöt. 2016. Artikkelit Rauhalahden voimalaitoksen savukaasupesurista Jyväskylän Energian sivustolla. Viitattu 22.1.2018. http://www.jyvaskylanenergia.fi/artikkelit/artikkeli/1947/uusi_savukaasupesuri_mini_moi_rauhalahden_voimalaitoksen_paastot
- Spencer, B. 2011. Heat Exchangers: Types, Design, and Applications. New York: Nova Science Publishers.
- Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin. 2017. Tietoa energian hinnoista tilastokeskuksen sivustolla. Viitattu 7.2.2018. http://www.tilastokeskus.fi/til/ehi/2017/03/ehi_2017_03_2017-12-07_kuv_005_fi.html.
- Teho ja vesivirta kaukolämmön maksuperusteina, suositus, julkaisu K15/2014. Energiateollisuus Ry. Viitattu 4.2.2018. https://energia.fi/files/586/Teho_ja_vesivirta_SuositusK15_2014.pdf.
- Teollisuuden energiatekniikka Peruskaavat ja – käsitteet. 2011. Energiatalous ja voimalaitostekniikan tukimateriaali. Viitattu 4.2.2018. https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/188122/mod_resource/content/1/Ene-59_4101_peruskaavat_ja_kasitteet.pdf.
- Tytär- ja osakkuusyhtiöt. N.d. Tietoa JE-yhtiön omistuksista Jyväskylän Energian sivustolla. Viitattu 22.1.2018. <http://www.jyvaskylanenergia.fi/je-yhtiot/tytar-ja-osakkuusyhtiot>.
- Uusi lattialle asennettava DSE Flexd- lämmönjakokeskus. N.d. Uutisarkisto Danfoss:in sivustolla. Viitattu 13.2.2018. <http://heating.danfoss.fi/newsstories/heating/dse-flex/?ref=17179916439#/>.
- Vuoden 2016 sää. N.d. Vuositilastoja ilmatieteen laitoksen sivustolla. Viitattu 8.2.2018. <http://ilmatieteenlaitos.fi/vuosi-2016>.
- Yhteiskuntavastuuraaportti. 2016. Jyväskylän energia-yhtiöiden vuoden 2016 yhteiskuntavastuuraaportti. Viitattu 1.3.2018. http://www.jyvaskylanenergia.fi/filebank/2618-JE_yhteiskuntavastuuraaportti_2016.pdf.

Liitteet

Liite 1. Erään kohteen tuntiset meno- ja paluulämpötilat vuodelta 2017.



Liite 2. Esimerkki tutkimuksessa käytetystä tuntidatasta

Hour values

☒ Interval ☐ Day ☐ Week ☐ Month ☐ Year

Reading values

Period1.1.2012031.12.20120Get Readings

Tariff...

Timezone; Unit+02 with Daylight saving time°C

Drag a column header here to group by that column.

1.1.2012 - 31.12.2012	JYV000KL_..._COUNTER T13/60 Sum:736627 Max:116,3 Min:67,4 Avg:84,09 wstatus:Metered			JYV000KL_..._COUNTER T14/60 Sum:317782,5 Max:54,1 Min:14,8 Avg:36,277 wstatus:Metered		
Time	Value	Status	Cumulati...	Value	Status	Cumulati...
su 1.1.2012 00:00 +2	99,7	Metered		38,9	Metered	
su 1.1.2012 01:00 +2	100,9	Metered		30	Metered	
su 1.1.2012 02:00 +2	101	Metered		38,7	Metered	
su 1.1.2012 03:00 +2	100,5	Metered		38,9	Metered	
su 1.1.2012 04:00 +2	99,8	Metered		38,9	Metered	
su 1.1.2012 05:00 +2	97,3	Metered		38,9	Metered	
su 1.1.2012 06:00 +2	96,3	Metered		38,6	Metered	
su 1.1.2012 07:00 +2	96,1	Metered		38,4	Metered	
su 1.1.2012 08:00 +2	95,8	Metered		38,4	Metered	
su 1.1.2012 09:00 +2	96	Metered		38	Metered	
su 1.1.2012 10:00 +2	95,8	Metered		36,3	Metered	
su 1.1.2012 11:00 +2	95,8	Metered		32,8	Metered	
su 1.1.2012 12:00 +2	94,9	Metered		33,8	Metered	
su 1.1.2012 13:00 +2	96,4	Metered		36,7	Metered	
su 1.1.2012 14:00 +2	97,2	Metered		30,9	Metered	
su 1.1.2012 15:00 +2	96,3	Metered		33,7	Metered	
su 1.1.2012 16:00 +2	96,3	Metered		28,1	Metered	
su 1.1.2012 17:00 +2	96,7	Metered		32,6	Metered	
su 1.1.2012 18:00 +2	96,5	Metered		36,3	Metered	

Liite 4. Esimerkki vastavalmistuneesta kohteesta, jossa ei vielä ole kulutusta

Hour values

Interval

Day

Week

Month

Year

Reading values

Period

1.1.2017

0

31.12.2017

0

Get Readings

Tariff

...

Timezone; Unit

+02 with Daylight saving time

°C

Drag a column header here to group by that column.

1.1.2017 - 31.12.2017

JYV000KL_...COUNTER

T13/60

Sum:668073 Max:113 Min:0

Avg:76.474 wstatus:Failing

JYV000KL_...COUNTER

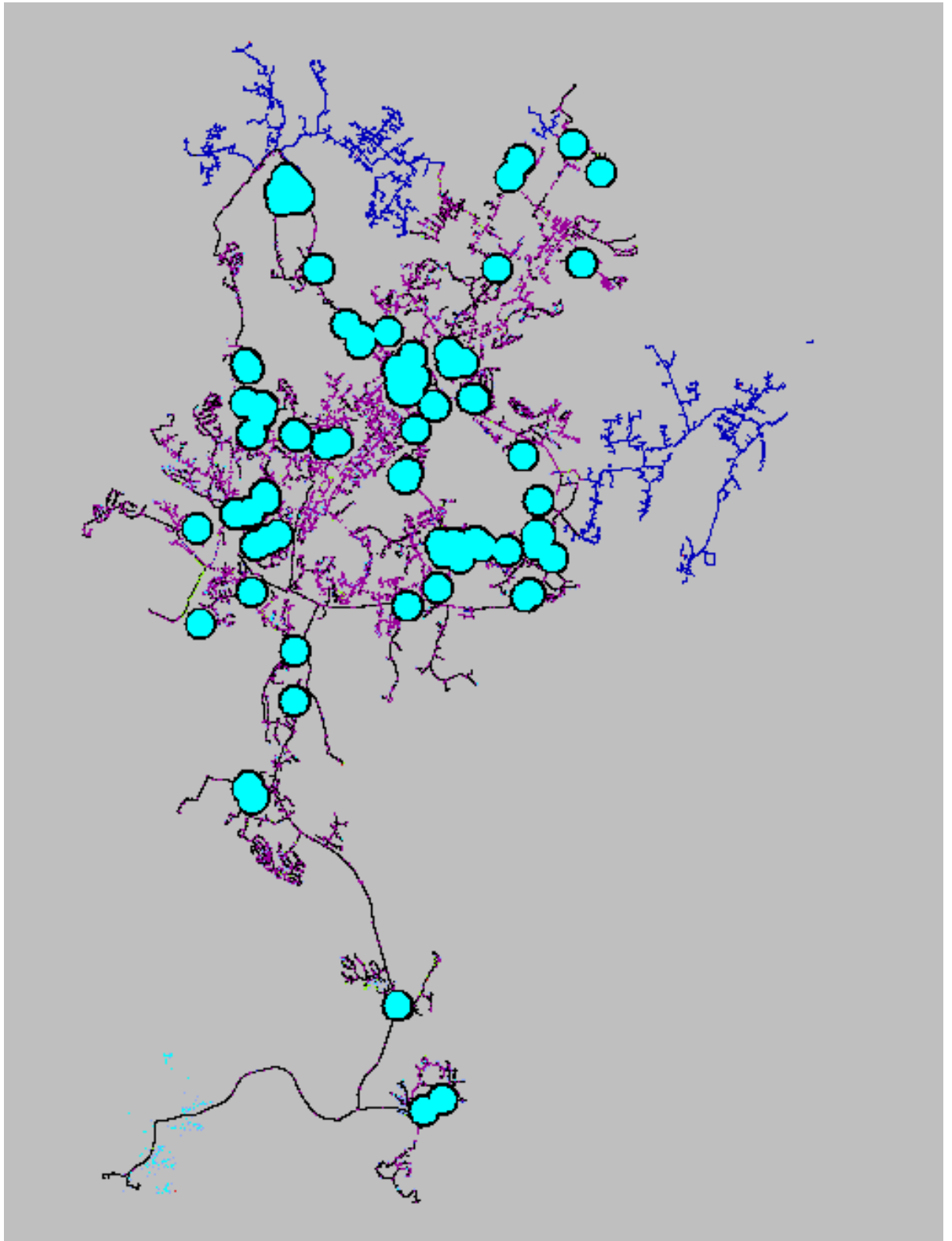
T14/60

Sum:348507 Max:103 Min:14

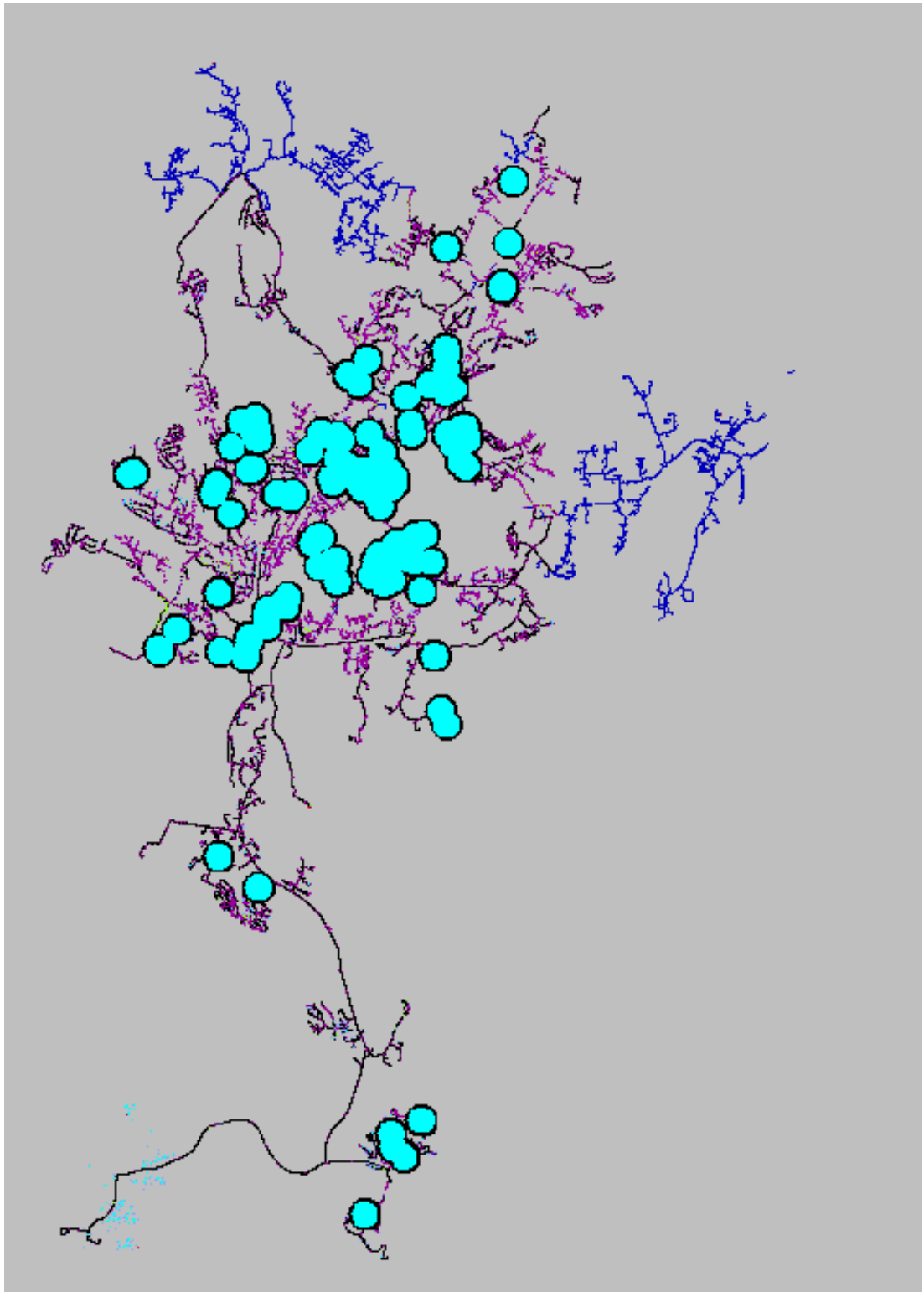
Avg:39.893 wstatus:Blackout

Time	Value	Status	Cumulati...	Value	Status	Cumulati...
su 1.1.2017 00:00 +2	83	Metered		79	Metered	
su 1.1.2017 01:00 +2	83	Metered		79	Metered	
su 1.1.2017 02:00 +2	83	Metered		79	Metered	
su 1.1.2017 03:00 +2	83	Metered		79	Metered	
su 1.1.2017 04:00 +2	83	Metered		79	Metered	
su 1.1.2017 05:00 +2	84	Metered		80	Metered	
su 1.1.2017 06:00 +2	84	Metered		80	Metered	
su 1.1.2017 07:00 +2	84	Metered		80	Metered	
su 1.1.2017 08:00 +2	84	Metered		80	Metered	
su 1.1.2017 09:00 +2	84	Metered		80	Metered	
su 1.1.2017 10:00 +2	85	Metered		81	Metered	
su 1.1.2017 11:00 +2	86	Metered		82	Metered	
su 1.1.2017 12:00 +2	88	Metered		84	Metered	
su 1.1.2017 13:00 +2	90	Metered		85	Metered	
su 1.1.2017 14:00 +2	90	Metered		86	Metered	
su 1.1.2017 15:00 +2	90	Metered		86	Metered	
su 1.1.2017 16:00 +2	90	Metered		85	Metered	
su 1.1.2017 17:00 +2	90	Metered		86	Metered	
su 1.1.2017 18:00 +2	91	Metered		86	Metered	

Liite 5. Uusien otantakohteiden topologinen jakautuminen



Liite 6. Vanhojen otantakohteiden topologinen jakautuminen



Liite 7. Esimerkki mittausteknisistä ongelmista tuntidatassa

Hour values

Interval

Day

Week

Month

Year

Reading values

Period

1.1.2017

0

31.12.2017

0

Get Readings

Tariff

...

Timezone; Unit

+02 with Daylight saving time

°C

Drag a column header here to group by that column.

1.1.2017 - 31.12.2017	JYV000KL_..._COUNTER T13/60 Sum:652194,79 Max:105,23 Min:0 Avg:74,656 wstatus:Failing			JYV000KL_..._COUNTER T14/60 Sum:347839,67 Max:60,44 Min:16,75 Avg:39,817 wstatus:...		
Time	Value	Status	Cumulati...	Value	Status	Cumulati...
ke 20.9.2017 12:00 +3		Failing		40	Estimate...	
ke 20.9.2017 13:00 +3		Failing		40	Estimate...	
ke 20.9.2017 14:00 +3		Failing		40	Estimate...	
ke 20.9.2017 15:00 +3		Failing		40	Estimate...	
ke 20.9.2017 16:00 +3		Failing		40	Estimate...	
ke 20.9.2017 17:00 +3		Failing		40	Estimate...	
ke 20.9.2017 18:00 +3		Failing		40	Estimate...	
ke 20.9.2017 19:00 +3		Failing		40	Estimate...	
ke 20.9.2017 20:00 +3		Failing		40	Estimate...	
ke 20.9.2017 21:00 +3		Failing		40	Estimate...	
ke 20.9.2017 22:00 +3		Failing		40	Estimate...	
ke 20.9.2017 23:00 +3		Failing		40	Estimate...	
to 21.9.2017 00:00 +3		Failing		40	Estimate...	
to 8.6.2017 10:00 +3	63,81	Blackout		60,44	Blackout	
su 1.1.2017 00:00 +2	77,94	Metered		38,33	Metered	
su 1.1.2017 01:00 +2	77,97	Metered		37,61	Metered	
su 1.1.2017 02:00 +2	77,52	Metered		38,37	Metered	
su 1.1.2017 03:00 +2	78,16	Metered		38,81	Metered	
su 1.1.2017 04:00 +2	78,41	Metered		38,46	Metered	